

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique UNIVERSITE

MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Fin d'Etude
de MASTER ACADEMIQUE**
Domaine: science et technologies
Filière : électrotechnique
Spécialité: Machines électriques

Présenté par

Ait oumessaoud m'hamed
Amer ouali djamal

Thème

**Calcul et mesures des pertes fer dans le
stator d'une machine asynchrone**

Mémoire soutenu le25 septembre 2018 devant le jury composé de :

Mr MIOUAT Azzouz

MAA.UMMTO. President

Mr KIMOUCHE Abdelghani

MAA . UMMTO. Encadreur

Mr KHALDI Rabah

MAA. UMMTO. Examineur

Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, notre dieu le plus puissant qui a bien voulu nous donner la force et le courage pour effectuer le présent travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur "Mr. Kimouche Abdelghani" pour son sérieux, sa compétence et ses orientations.

Nos sincères remerciements aux messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Nous remercions aussi à tous les enseignant du département Génie électrique qui ont contribué à notre formation.

Enfin ne tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour tout le soutien moral et matériel....

AMER OUALI Djamel

AIT OUMESSAOUD Mhamed

Nomenclature

C_u	Le couple utile [N.m]
P_u	La puissance utile [W]
Ω	La vitesse de rotation [rd/s]
Ω_s	vitesse de synchronisme en [rd/s]
ω_s	Pulsation électrique du champ tournant en [rd/s]
P	nombre de pair de pôles
N_s	vitesse de synchronisme en [tr/min]
J	courant dans un enroulement [A]
$\cos(\varphi)$	Facteur de puissance
P_a	Puissance absorbé [W]
T	Le couple [N.m]
P_{js}	Pertes joule statorique
P_{hys}	Pertes par hystérésis [w]
K_h	Coefficient des pertes par hystérésis
B_{max}	Induction magnétique maximal [Tesla]
P_{jr}	Les pertes par effet joule rotorique
m_1	Nombre de phase au stator
I_1	Courant d'une phase au stator
r'	Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator
K_i	Coefficient d'augmentation des pertes due à l'effet de peau
K_{di}	Coefficient de distribution de l'enroulement statorique
P_{mec}	Puissance mécanique [W]
n_1	vitesse de rotation [tr/min]
$\vec{J}d$	La densité de courant de déplacement
$\vec{J}c$	La densité de courant du conducteur
\vec{H}	Le champ magnétique [A/m]

Nomenclature

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	Densité de courant de déplacement [A/m^2]
\vec{B}	L'induction magnétique [T]
\vec{E}	Le champ électrique [V/m]
\vec{D}	L'induction électrique [C/m^2]
ρ	La densité de charge volumique [C/m^3]
\vec{B}_r	Le vecteur d'induction magnétique rémanente
μ_r	La perméabilité relative
μ_0	La perméabilité du vide
ϵ_0	La permittivité absolue du vide
ϵ_r	La permittivité relative du milieu
\vec{J}_s	La densité du courant d'excitation de source [A/m^2]
\vec{u}	Vecteur des pièces conductrices susceptible de se déplacer [m/s]
σ	La conductivité électrique [S/m]
\vec{A}	Potential vecteur magnétique
β	Coefficient de dilatation des tôles
K_{dc}	Coefficient total de majoration des pertes tenant compte de L'imperfection de la technologie
G_{cl}	Le poids total de la culasse
γ_c	Masse volumique
K_{fer}	Coefficient de remplissage du paquet de tôles statoriques
τ_p	Le pas polaire
K_{dz}	Coefficient de majoration des pertes dans les dents statorique
G_{zl}	Le poids total des dents statorique
B_{z1max}	Induction maximale dans la dent statorique
t_1	Pas dentaire

Nomenclature

Liste des tableaux

Tableau III.1 : les paramètres de la machine à étudiée relevé avec le pied à coulisse.....	28
Tableau III.2 : les paramètres du bobinage concentrique d'une MAS	29
Tableau III.3 : les valeurs mesurée (avec onduleur).....	35
Tableau III.4 : les valeurs mesuré (sans onduleur).....	36
Tableau III.5 : Les relevées du stator	37
Tableau III.6 : les résultats de calcul des pertes dans la culasse avec la méthode analytique...37	
Tableau III.7 : Les résultats de calcul des pertes dans la dent statorique avec la méthode analytique.....	37
Tableau III.8 : Le résultat final des pertes avec le calcul de dimensionnement (analytique)	38
Tableau III.9 : Les résultats de calcul des pertes fers pour l'essai avec onduleur.....	38
Tableau III.10 : Les résultats de calcul des pertes fers pour l'essai sans onduleur ($f=50\text{Hz}$).....	38
Tableau III.11 : Les résultats des trois méthodes.....	39

Liste des figures

Figure I.1 : symbole de la machine asynchrone à cage d'écureuil	2
Figure I.2 : la machine asynchrone.....	3
Figure I.3 : les différents composants d'un moteur asynchrone à cage.....	3
Figure I.4 : les deux parties essentielles de la machine asynchrone	4
Figure I-5: Stator bobiné.....	5
Figure I-6 : rotor à cage d'écureuil.....	5
Figure I-7 : la structure de la cage.....	5
Figure I-9 : Le bilan de puissance de la machine asynchrone à cage.....	9
Figure II.1 : Types d'élément en 2D.....	20
Figure II.2 : Types d'élément en 3D.....	20
Figure III.1 : Vue de stator étudié en 2D et 3D sous Maxwell.....	27
Figure III.2 : le stator et les trois enroulements concentriques en 3D.....	28
Figure III.3 : bobinage concentrique d'une MAS sous Maxwell.....	29
Figure III.4 l'organisme des étapes de logiciel de Maxwell.....	31
Figure III.5 : le maillage d'une demi-coupe du stator en 3D.....	31
Figure III.6 : la distribution de l'induction magnétique du stator.....	32
Figure III.7 : les courants des phases statoriques.....	32
Figure III.8 : Les tensions de phase du stator	33
Figure III.9 : Schéma de montage d'un stator alimenter par un onduleur pour mesurer les pertes fers.....	33
Figure III.10: photo de banc d'essai pour mesuré les pertes fers (avec onduleur)...	34
Figure III.11 : Schéma de montage d'un stator alimenté par une source pour mesurer les pertes fers.....	35
Figure III.12 : photo de banc d'essai pour mesuré les pertes fers (alimenter par la source).....	36
Figure III.13 : les pertes fers en fonction de la tension au carré.....	39

Liste des figures

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : Généralité et pertes dans la machine asynchrone	
I.1 Introduction.....	2
I.2 généralité sur la machine asynchrone.....	2
I.2.1 définition.....	2
I.2.2 constitution de la machine asynchrone à cage.....	3
I.2.2 a) le stator.....	4
I.2.2 b) le rotor.....	5
I.2.3 principe de fonctionnement.....	5
I.2.4 le champ tournant.....	6
I.2.5 la vitesse de synchronisme.....	6
I.2.6 le glissement.....	7
I.2.7 le couple.....	7
I.3 le bilan de puissance de la machine asynchrone à cage.....	8
I.3.1 la puissance électrique absorbée.....	8
I.3.2 la puissance transmise à travers l'entrefer.....	9
I.3.3 la puissance électromagnétique.....	9
I.3.4 la puissance mécanique.....	10
I.3.5 la puissance utile.....	10
I.3.6 le rendement.....	10
I.4 les différentes pertes dans le moteur asynchrone.....	11
I.4.1 les pertes fer.....	11
I.4.1 a) les pertes par courant de Foucault.....	11
I.4.1 b) les pertes par hystérésis.....	12
I.4.2 les pertes joules.....	12
I.4.2 a) les pertes joules statorique.....	12
I.4.2 b) les pertes joules rotorique.....	12
I.4.3 pertes mécaniques.....	13
I.4.4 les pertes supplémentaire.....	13
I.4.4.1 les pertes fer supplémentaires.....	13

Sommaire

I.4.4.2 les pertes supplémentaires dans le circuit électrique.....	13
I.4.4.3 les pertes supplémentaires dans le circuit magnétique.....	14
conclusion.....	14
Chapitre II : méthodes de calcul des pertes fer	
II.1.Introduction.....	15
II.2 : les équations de Maxwell.....	15
II. 2.1 l'équation de MAXWELL-AMPERE.....	15
II. 2.2 l'équation de MAXWELL-GAUSS	15
II. 2. 3 l'équation de MAXWELL-FARADAY	16
II. 3. Les lois de comportement de milieu	16
II.3.1Relation diélectrique	16
II.3.2Relation magnétique	16
II.3.3 Relation électrique (loi d'Ohm)	18
II.4. Le modèle magnétodynamique	18
II.5. hypothèse de simplification considérée pour l'étude de la machine asynchrone	19
II.6. Méthode des résolutions des équations	19
II.6.1 Méthode numérique (MEF)	20
II.6.1.1 Types d'éléments finis	20
II.6.1.2Principe de la méthode des éléments finis	20
II.6.1.3 conditions aux limites.....	21
.a) condition Dirichlet.....	21
a.1) Dirichlet homogène.....	22
a.2) Dirichlet non homogène.....	22
b) Condition de Neumann.....	22
b.1) Condition Neumann homogène.....	22
b.2) Condition Neumann non homogène.....	22
c)Condition mixte Dirichlet et Neumann.....	22
II.6.2 : Méthode analytique	23

Sommaire

II.6.2.1 : Les pertes dans la culasse statorique (P_{fcl})	23
II.6.2.2 Les pertes dans les dents statorique	25
Conclusion	26

Chapitre III : modélisation, Calcul et mesure des pertes fers

III.1. Introduction.....	27
III.2.Présentation de dispositif (stator creux avec bobinage).....	27
III.2.1 : paramètres de la machine étudiée (MAS à cage).....	28
III.2.2.Présentation du bobinage concentrique.....	29
III.3 : calcul des performances par élément finis.....	30
III.3.1 : exploitation du logiciel Maxwell 14.0.....	30
III.3.2 : le maillage.....	31
III.3.3: visualisation de l'induction magnétique.....	32
III.3.4 : visualisation du courant et la tension des bobines du stator.....	32
III.3.5 : visualisation des pertes fers.....	33
III.4.Travail effectué au laboratoire (expérimental).....	33
III.4.1.essai avec un variateur de fréquence (onduleur).....	34
III.4.2 : Stator alimenté directe par la source (sans onduleur).....	35
III.5 : résultats de calcul des pertes fers avec les différentes méthodes.....	37
III.5.1 : résultat de la méthode analytique.....	37
III 5.1.1 : les pertes dans la culasse statorique et dans les dents.....	37
III.5.2 : résultats de la méthode expérimentale.....	38
III.6 : Les résultats finaux.....	39
Conclusion.....	40

Conclusion générale.....	41
--------------------------	----

Bibliographie

Annexe

Introduction générale

Les machines asynchrones triphasées sont largement utilisés dans l'industrie, leur simplicité de construction en fait un matériel très fiable et qui ne demande pas d'entretien, elles ont un bon rendement (moins de perte) et aussi une facilité de mise en œuvre.

Lors du fonctionnement de ces machines, une certaine quantité d'énergie se dissipe sous formes de chaleur, quelque pertes sont facile à déterminé comme les pertes joules statorique, alors que d'autres sont difficiles à déterminé tel que les pertes mécaniques et les pertes fers et les pertes supplémentaires.

Il y a tellement de travaux qui donnent d'importance à l'amélioration le rendement des machines asynchrone en minimisant les pertes fers

L'objectif du travail au quel nous nous intéressons est d'estimé les pertes fers dans un stator creux d'une machine asynchrone en employant des méthodes différentes à savoir la méthode analytique et la méthode des éléments finis' en suite comparer les résultats obtenues a ceux de la partie expérimentale.

Le mémoire est structuré on trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on va présenter des généralités sur la machine asynchrone triphasé, les éléments de construction sont abordés au début de chapitre, le deuxième partie on d'écrivent le fonctionnement et les différentes pertes dissipé par la machine asynchrone ainsi que le billon de puissance.

Le deuxième chapitre, on décrit d'abord les équations de Maxwell, puis on présente les différents méthodes de calcule des pertes fers (méthode des éléments fini, méthode analytique).

Le troisième chapitre, traitera le calcule de pertes fers dans la machine asynchrone basé sur les méthodes qu'on a présenté au deuxième chapitre, ainsi, que la méthode expérimentale et enfin l'exploitation de la méthode des éléments fini en utilisant le logiciel Maxwell 14.0 pour déterminé les performances électromagnétique de la machine.

On fin, une comparaison est faite entre les résultats obtenue avec les différentes méthodes de calcul.

I-1-Introduction :

Lors du fonctionnement de la machine asynchrone, un processus s'effectue, soit d'une énergie électrique en énergie mécanique, soit l'inverse. Cette transformation s'effectue inévitablement par une certaine perte d'énergie sous forme des pertes des puissances dans ces différents composants qui influe directement sur le rendement de la machine et par suite sur la puissance fournie.

Ces pertes se répartissent comme suit :

- Les pertes dans le circuit électrique.
- Les pertes dans le circuit magnétique.
- Les pertes dans les parties mécaniques.
- Les pertes supplémentaires.

Dans ce chapitre, nous commençons d'abord par des généralités sur la construction de la machine asynchrone, puis nous terminons par donner les différentes pertes qui résultent du fonctionnement de cette machine. [1]

I-2- Généralités sur la machine asynchrone :

I-2-1-Définition :

La machine asynchrone est une machine électrique basée sur le principe du champ tournant, connue également sous le terme machine à induction qui fonctionne avec un courant alternatif, sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone veut dire que la vitesse de rotation du rotor est différente de celle du champ tournant statorique. [3]

Elle est symbolisée comme suit :

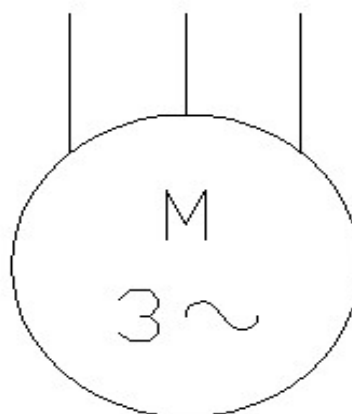


Figure I.1 : symbole de la machine asynchrone à cage d'écureuil

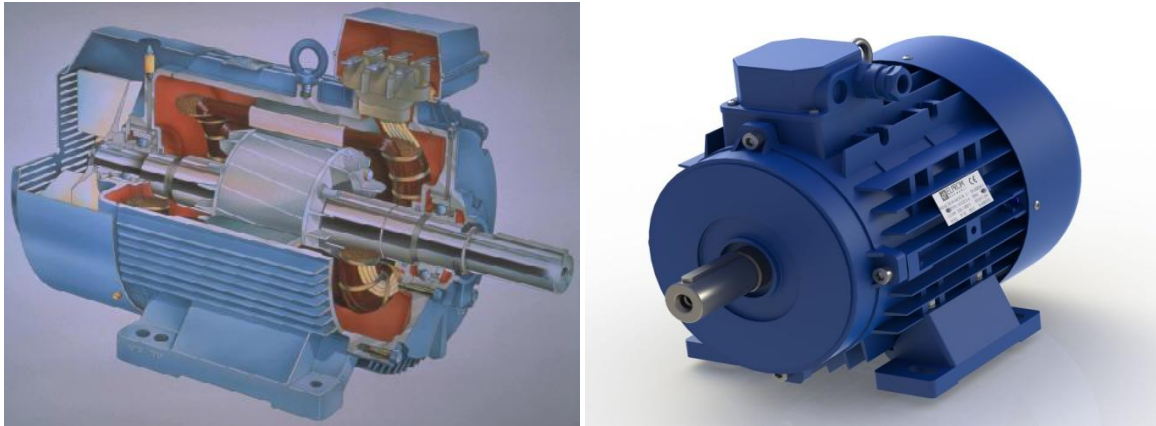


Figure I.2 : la machine asynchrone

I-2-2 : constitution de la machine asynchrone à cage

La figure ci-dessous montre les différents composants du moteur asynchrone à cage :

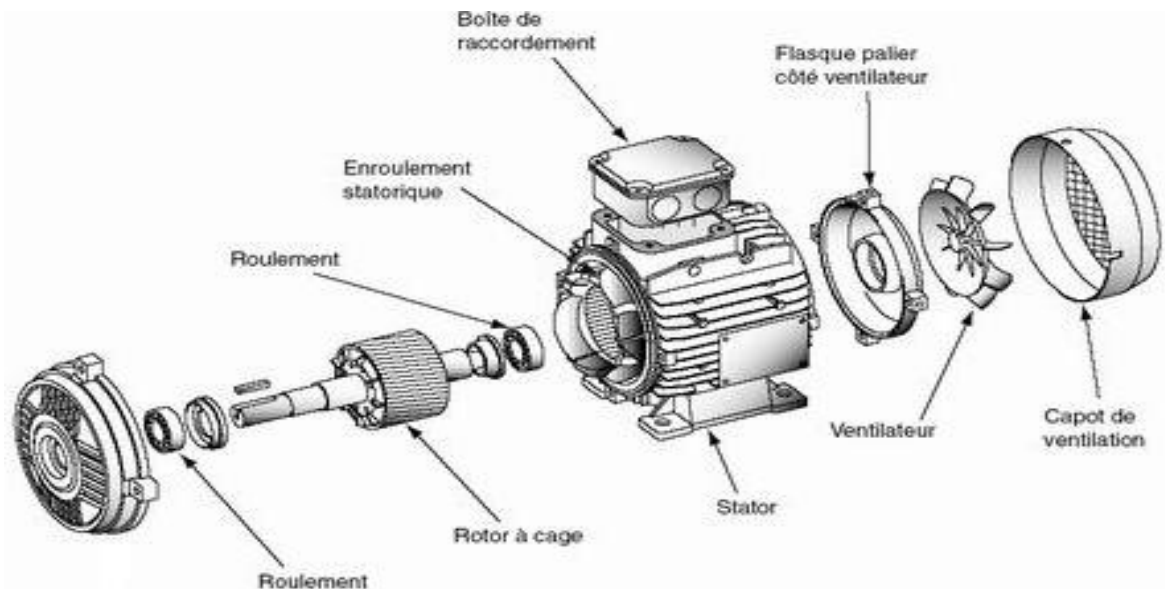


Figure I.3 : les différents composants d'un moteur asynchrone à cage

La machine asynchrone comprend essentiellement de deux parties :

- Une partie fixe (stator)
- Une partie mobile (rotor)

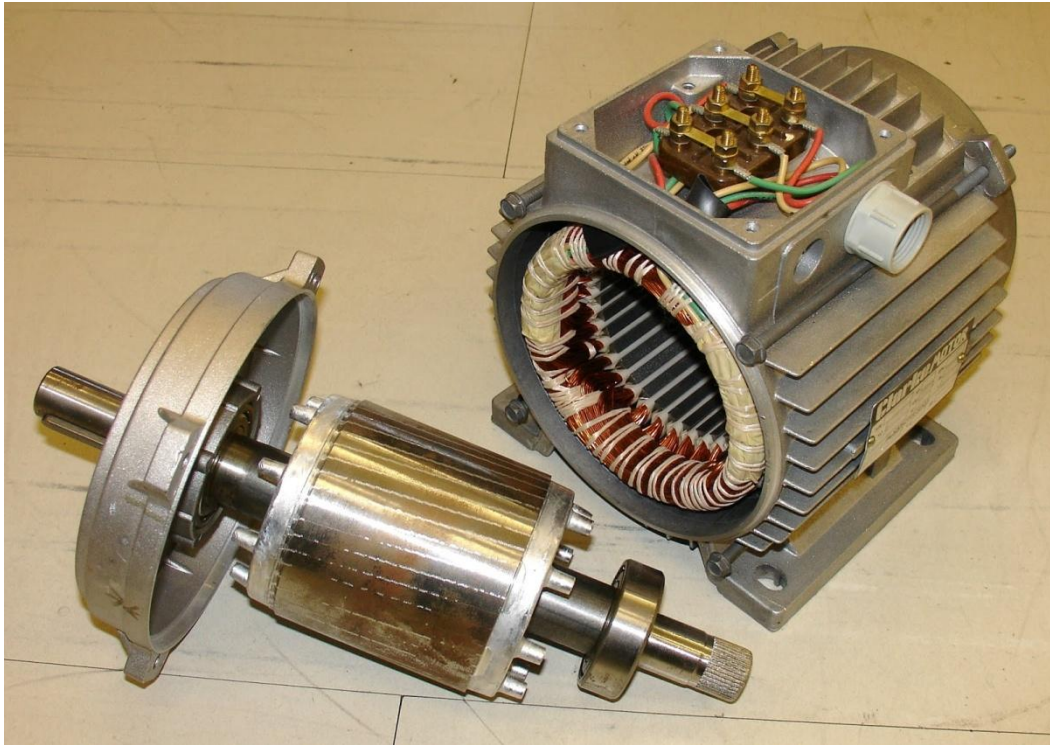


Figure I.4 : les deux parties essentielles de la machine asynchrone

I-2-2-a : Stator

Le stator d'un moteur asynchrone est la partie fixe ou immobile, que dite aussi inducteur, qui est formé principalement par :

- de la carcasse,
- des paliers,
- des flasques de palier,
- du ventilateur refroidissant le moteur,
- le capot protégeant le ventilateur.

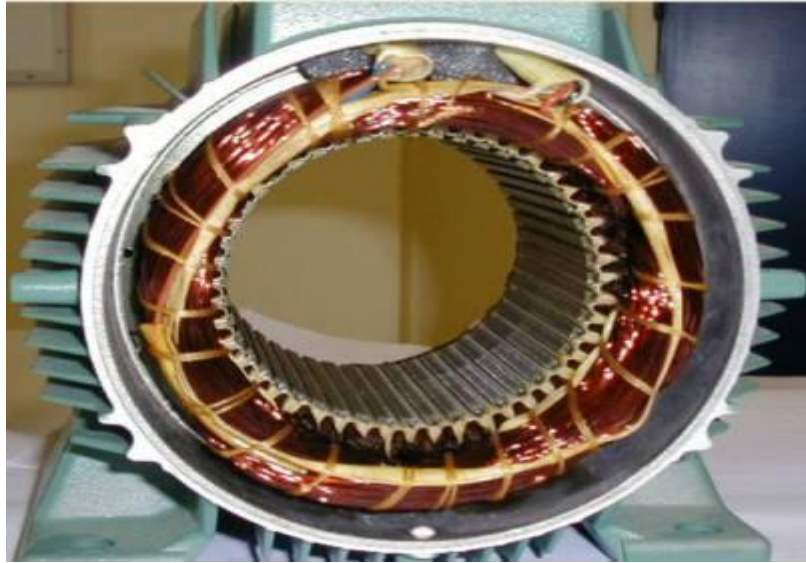


Figure I-5: Stator bobiné

I-2-2-b: Rotor

Le rotor est la partie mobile dans la machine, il est de forme cylindrique séparé du stator par un entrefer d'épaisseur constante, il existe deux types de rotor : le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné. [1]

Dans notre cas on s'intéresse au rotor à cage d'écureuil, ce rotor est constitué par un cylindre de tôle empilées pour former des encoches, les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium nues conductrices du cylindre rotorique et ils sont situées dans les encoches et réunies à leurs deux extrémités par anneaux conducteur qui les court-circuitent. [1]



Figure I-6 : rotor à cage d'écureuil

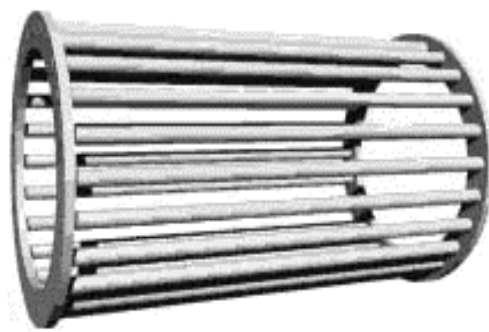


Figure I-7 : la structure de la cage

I-2-3 : Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une machine asynchrone triphasé à cage est basé sur trois principes de l'électrotechnique [1] :

- principe I : création d'un champ magnétique par un courant et qui est défini par la loi d'ampère.
 - Principe II : force exercée sur un fil parcourue par un courant placée dans un champ magnétique et qui est défini par la loi de Laplace.
 - Principe III : déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique, induction d'une tension et qui est défini par la loi de l'induction électromagnétique de Faraday.
- [1]

Ce qui permet au rotor de tourner c'est le principe des champs magnétiques tournant produit par des tensions alternatives. Trois enroulements sont disposés dans le stator à 120° les uns des autres, une fois alimentés trois champs magnétiques indépendants sont créés. Ces champs magnétiques sont déphasés dans le temps de par la même nature du courant triphasé la vitesse du champ magnétique sera toujours supérieure à celle du rotor, les deux vitesses ne peuvent être synchrones d'où le nom de moteur asynchrone.

La vitesse d'un moteur en tours par minutes dépend de la fréquence du réseau qui alimente le stator en Hz et de nombre de pôle du moteur donc pour faire varier la vitesse d'un moteur il suffit de modifier la fréquence ou le nombre de pôle.

I-2-4 : Le champ tournant

C'est la variation du flux magnétique créée par les courants statoriques. Sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence des courants statoriques. C'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme angulaire Ω_s [rad/s]. [1]

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{I.1})$$

Ou bien
$$\Omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

Ω_s : Vitesse angulaire de synchronisme en [rad/s]

ω_s : pulsation électrique synchrone du champ tournant en [rad/s]

P : Le nombre de paires de pôles

N_s : vitesse synchronisme en [tr/min]

I-2-5 : La vitesse de synchronisme

Sur les machines asynchrones, la vitesse de synchronisme dépend de la fréquence de la source et du nombre de pôle de la machine. [1], [3]

$$N_s = \frac{60f}{p} \quad (I.3)$$

Avec :

N_s : Vitesse de synchronisme en [tr/min]

f : Fréquence [Hz]

p : Nombre de paires de pôles.

I-2-6 : Le glissement

Le glissement qu'on le note g est le rapport entre la vitesse du glissement $(N_s - N)$ du rotor par rapport du champ tournant du stator à la vitesse de synchronisme N_s . [2], [4]

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (I.4)$$

Avec :

g : Le glissement

N_s : La vitesse de synchronisme [tr/min]

N : La vitesse de rotation [tr/min]

I-2-7 : Le couple

On appelle le couple électromagnétique la résultante de l'interaction des deux flux rotoriques et statoriques. La conversion d'énergie électrique en énergie mécanique permet de développer un couple utile sur l'arbre du moteur.

On étudie le principe de l'obtention d'un couple par interaction du champ magnétique et par effet reculant, ces deux phénomènes découlent de l'étude de l'induction dans l'entrefer du moteur. [2]

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} [\text{N.m}] \quad (I.5)$$

Avec :

C_u : Le couple [N.m]

Ω : La vitesse de rotation [rad/s]

P_u : La puissance utile [W]

I-3 : le bilan de puissance de la machine asynchrone à cage

Lors de la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, la machine asynchrone absorbe du réseau une puissance électrique active P_a . Une partie de cette puissance est dissipée sous forme des pertes joules dans les enroulements du stator P_{js} . Par la suite, le champ magnétique génère les pertes dans le fer P_{fs} , par hystérésis et par courants de Foucault. Le reste de la puissance est transmise au rotor à travers l'entrefer. La grande partie de cette puissance est utilisée pour produire une puissance électromagnétique P_{em} , tandis que la présence d'un courant dans l'enroulement du rotor provoque des pertes par effet joule P_{jr} . La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile P_u qui sera par la suite transmise à la charge dans le mouvement du rotor, une partie de la puissance mécanique totale P_m est perdue par divers mécanisme de frottement du rotor, c'est ce qu'on appelle les pertes mécaniques ou rotationnelles P_{mec} . [5], [4]

Ce bilan de puissance et des pertes dans un moteur asynchrone est reporté sur la figure I-9 :

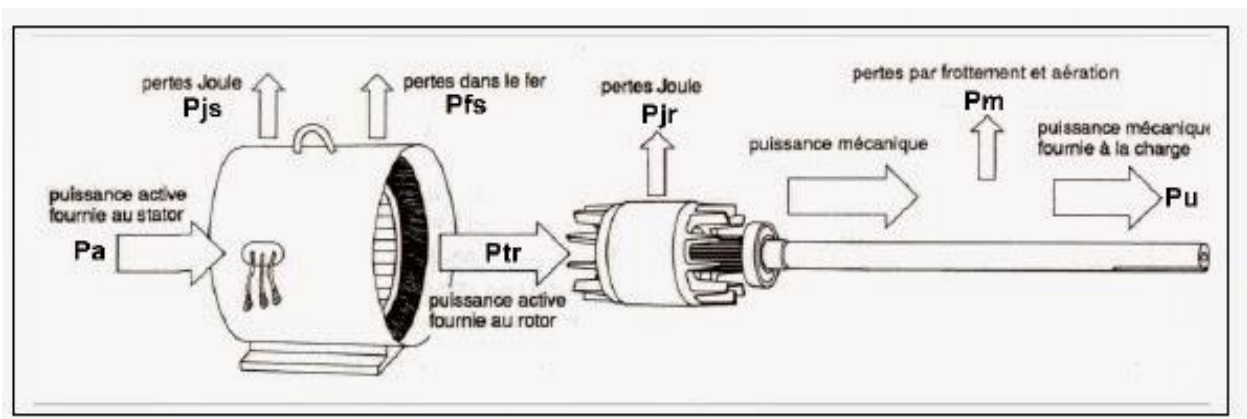


Figure I-9 : Le bilan de puissance de la machine asynchrone à cage

I-3-1 : La puissance électrique absorbée

La puissance électrique absorbée par un stator d'un moteur asynchrone lorsque de connexion au réseau électrique triphasé. [1]

$$P_a = \sqrt{3} U I \cos \varphi [W] \quad (I.6)$$

Avec :

P_a : puissance absorbée [W]

U : Tension composée aux bornes du moteur [V]

I : Courant de ligne [A]

$\cos \varphi$: Facteur de puissance du moteur

I-3-2 : la puissance transmise à travers l'entrefer :

La puissance transmise à travers l'entrefer au rotor est la partie de puissance absorbée qui n'est pas perdue dans les enroulements du stator et dans le fer elle est donnée comme suit [1] :

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fer}) \quad (I.7)$$

Avec :

P_{tr} : puissance transmise au rotor à travers l'entrefer [W]

P_a : puissance absorbé du réseau [W]

P_{js} : les pertes par effet joule statorique [W]

P_{fer} : les pertes fer [W]

I-3-3 : la puissance électromagnétique :

La puissance électromagnétique P_{em} transmise au rotor par le champ tournant est égale à [1] :

$$P_{em} = P_a - (P_{js} + P_{fer}) \quad (I.8)$$

Avec :

P_{tr} : puissance transmise au rotor à travers l'entrefer [W]

P_a : puissance absorbé du réseau [W]

P_{js} : les pertes par effet joule statorique [W]

P_{fer} : les pertes fer [W]

I-3-4 : La puissance mécanique

La puissance mécanique c'est la puissance transmise à l'arbre du moteur :

$$P_m = P_{tr} - P_{jr} = (1 - g) \cdot P_{tr} [\text{W}] \quad (\text{I.9})$$

Avec des pertes fer rotorique négligées.

P_m : Puissance mécanique [W]

P_{tr} : Puissance transmise au rotor

p_{jr} : Pertes joule rotoriques

g : Glissement

I-3-5 : La puissance utile

De la puissance mécanique on soustrait les pertes mécaniques p_{mec} pour arriver à la puissance utile. [1]

$$P_u = P_m - p_{mec} [\text{W}] \quad (\text{I.10})$$

Avec :

P_u : puissance utile

P_m : Puissance mécanique

P_{mec} : Pertes mécanique

I-3-6 : Le rendement

Le rendement d'un moteur est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée : [2]

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I.11})$$

Avec :

η : Le rendement

P_u : Puissance utile [W]

P_a : Puissance absorbée [W]

I-4 : Les différentes pertes dans le moteur asynchrone

Dans ce chapitre on représente les différentes pertes dans un moteur asynchrone :

I-4-1 : Les pertes fer

Les pertes fer sont en fonctions du flux magnétique. Elles ne dépendent que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statorique. Or, en régime de fonctionnement, ces grandeurs ne varient pas et par conséquent, les pertes fer peuvent être considérées comme constantes quelle que soit la charge du moteur. Dans la pratique, les pertes fer sont mesurées lors d'un essai à vide, en même temps que les pertes rotationnelles. [2][10]

Elles sont constituées de deux types des pertes dans la machine asynchrone les pertes par courant de Foucault et les pertes par Hystérésis

I-4-1-a : Les pertes par courant de Foucault

Les pertes par courant de Foucault résultent des variations temporelles des flux qui induisent dans la masse du fer des forces électromotrices (f.é.m). Ces dernières donnent naissance à des courants qui se referment dans la masse du fer [2]. Ces pertes d'énergie P_f dépendent de la nature du matériau, et de son volume, de la fréquence f et de l'intensité magnétique B . [1]

Pour limiter ces pertes, on feuillette le circuit magnétique.

On peut calculer les pertes par effet de Foucault en utilisant l'expression suivant : [5]

$$P_f = K_F (e_1 \cdot f \cdot B_{max})^2 \quad (I.12)$$

Avec :

P_f : pertes fer par courant de Foucault (W/kg)

K_F : coefficient caractéristique de la tôle.

B_{max} : induction maximale à la fréquence f (T)

e_1 : épaisseur de la tôle (m)

f : la fréquence de la source (Hertz)

I-4-1-b : Les pertes par hystérésis

Les pertes par hystérésis sont des pertes qui transforment en chaleur, et qui résultent des transformations de l'organisation de la matière sous l'effet de la variation en intensité et en direction du champ magnétique appliqué. [2]

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{hys} = K_H \cdot f \cdot B_{max}^2 \quad (I.13)$$

Avec :

P_{hys} : Puissance perdue par hystérésis [W/kg]

K_H : Coefficient des pertes par hystérésis

B_{max} : Induction maximale à la fréquence f [T]

I-4-2 : Les pertes joules

Elles représentent les pertes joules dans les enroulements du stator et du rotor. Elles sont proportionnelles au carré du courant qui traverse ces enroulements.

I-4-2-a : Pertes joules statorique

Cas d'un branchement en étoile :

$$P_{js} = 3R_s I_s^2 \text{ [W]} \quad (I.14)$$

Cas d'un branchement en triangle :

$$P_{js} = R_s I_s^2 \text{ [W]} \quad (I.15)$$

Avec :

R_s : Résistance d'une phase statorique

I_s : courant de ligne

I-4-2-b : pertes joules rotorique

$$P_{jr} = m_2 R_r I_r^2 \text{ [W]} \quad (I.16)$$

Avec :

R_r : la résistance d'une phase rotorique

I_r : le courant induit dans le rotor

m_2 : Nombre de barre rotorique

I-4-3 : Pertes mécaniques

Les pertes mécaniques ce sont des frottements de support ou des enroulements à bille au déplacement de l'acier par partie mobile et des frottements de l'air sur le rotor et sur les ventilations. [12]

On peut exprimer les pertes mécaniques par la relation suivante :

$$p_{mec} = K_t (n_1/10)^2 (D_{1ext} \cdot 10^{-3})^4 \quad (I.17)$$

Avec :

K_t : Facteur

D_{1ext} : Diamètre extérieure du stator [m]

I-4-4 : Les pertes supplémentaires

Il existe trois types des pertes supplémentaires sont :

I-4-4-1 : Les pertes fer supplémentaires

C'est la somme des pertes à la surface du rotor, et les pertes harmonique du flux dans les dents rotoriques et statoriques. [1], [10]

- **Pertes fer supplémentaires à la surface du rotor**

Ces pertes sont dues aux variations locales de l'induction provoquées à la surface d'un pôle par son déplacement relatif vis-à-vis des dents de l'induit. [2]

- **Pertes fer supplémentaires dues aux pulsations dans les dents**

Ces pertes sont créées dans les dents du rotor par la variation périodique d'induction dues au passage des dents statoriques. Il s'agit aussi des pertes analogues qui sont créées dans les dents du stator par le passage des dents rotoriques. Ces pertes n'existent que dans les machines à rotor et stator denté. [2], [3]

I-4-4-2 : les pertes supplémentaires dans le circuit électrique

Ces pertes qui son créés dans les encoches et qui peut modifier la densité du courant en charge par création des courants de Foucault et provoqué l'augmentation des pertes par effet joule (augmentation de la résistance des conducteurs).

Il existe aussi des pertes qui sont apparues à cause des discontinuités géométriques de la machine au niveau de l'entrefer. On trouve ces pertes :

- **Pertes dues au flux de fuite de phase**

Lorsque le nombre de phases est fini entraîne une distribution non sinusoïdale de la force magnétomotrice (FMM) dans l'entrefer, alors on engendre des pertes non négligeables. [2]

- **Les pertes dues au flux de fuite d'encoches**

Le fait que le nombre d'encoches par phase soit fini, entraîne une distribution non sinusoïdale de la FMM dans l'entrefer. [2]

Le flux de fuite d'encoche ou flux différentiel d'encoches ou encore flux zigzag apparaît et engendre des pertes qui sont déterminées par l'expression suivante :

$$P_{du} = m_1 I_1^2 r'_2 K_i K_{di} \quad (I.18)$$

Avec :

m_1 : Nombre de phases au stator

I_1 : Courant d'une phase au stator [A]

r'_2 : Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator, à la température de fonctionnement [Ω]

K_i : Coefficient d'augmentation des pertes dues à l'effet de peau

K_{di} : Coefficient de distribution de l'enroulement statorique

I-4-4-3 : les pertes supplémentaires dans le circuit magnétique

Ces pertes qui sont produites par les discontinuités de la machine, et les encoches dans l'entrefer implique une distribution discontinue de la FMM ce qui entraîne des pertes par pulsation dans les dents et des pertes à la surface des pôles. [2]

I-5 : Conclusion

Dans ce chapitre on a décrit les différentes parties qui constituent la machine asynchrone à cage, en suite on a défini les différentes pertes dans ces parties lors de son fonctionnement.

II.1. Introduction :

Afin de déterminer les performances électromagnétiques d'une machine asynchrone notamment les pertes fers nous présentons dans ce chapitre les méthodes utilisées ; pour cela, nous commençons par une représentation des équations dites de Maxwell et leur application dans les différents modèles car la méthode des éléments finis nécessite la connaissance de ces équations.

Les équations de Maxwell traduisent les lois physiques sous une forme différentielle, elles sont considérées comme des équations de base de l'électromagnétisme.

La résolution de ces équations se fait avec plusieurs méthodes (numérique, analytiques, semi-analytique...etc.), dans notre travail en s'intéresse à la méthode numérique et précisément la méthode des éléments finis.

II.2. les équations de Maxwell :

Les équations de Maxwell sont des lois fondamentales de la physique, et sont MAXWELL-AMPERE, MAXWELL-FARADAY et MAXWELL-GAUSS. L'ensemble de ces équations se rapportent à l'électromagnétisme, et plus particulièrement à la description des phénomènes magnétiques, électriques et lumineux. [5]

Ces équations permettent de reformuler les phénomènes électromagnétiques des différents dispositifs aux équations mathématiques.

II. 2.1 l'équation de MAXWELL-AMPERE :

La formule de Maxwell-Ampère stipule que le rotationnel du champ magnétique \vec{H} est généré de deux manières soit avec la variation d'un champ électrique ou par la variation du courant électrique [5], [6], [7].

Son expression est donnée par la relation suivante :

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II. 1})$$

$$\vec{j} = \vec{j}_d + \vec{j}_c \quad [A/m^2] \quad (\text{II.2})$$

Avec :

\vec{j}_c : La densité de courant du conducteur

\vec{j}_d : La densité de courant de déplacement

\vec{H} : Le champ magnétique [A/m]

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement [A/m^2]

II. 2.2 l'équation de MAXWELL-GAUSS :

La formule de Maxwell-Gauss stipule que la divergence du champ électrique est proportionnelle à la distribution de charges électriques ce qui veut dire que les charges

électrique génèrent un champ électrique, ce champ est orienté à partir des charges positive vers des charges négatives dans une surface de GAUSS fermée.

Ces équations sont des équations locales, ils sont applicable sur tous les milieux. Les grandeurs E et D ; H et B ; J et E (respectivement) ne sont pas indépendants car ils sont liées par les lois de comportement de milieu [5].

$$\mathit{div}\vec{D} = \rho \text{ (Équations de GAUSS électrique)} \quad (\text{II.3})$$

$$\mathit{div}\vec{B} = \mathbf{0} \text{ (Équation de GAUSS magnétique ou bien l'équation} \\ \text{De conservation du flux magnétique)} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

\vec{D} : L'induction électrique [C/m^2]

ρ : La densité de charge volumique [C/m^3]

II. 2. 3 l'équation de MAXWELL-FARADAY :

La formule de Maxwell-Faraday correspond au phénomène d'induction, c'est la relation entre le champ électrique et le champ magnétique d'où un champ électrique peut induire un champ magnétique, et stipule que le rotationnel du champ électrique E est inversement (signe moins) proportionnel à la variation du champ magnétique au cours du temps ($\partial B/\partial t$). C'est le principe utilisé dans le générateur électrique [5], [6].

Son expression est donnée par cette relation :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.5})$$

\vec{B} : L'induction magnétique [T]

\vec{E} : Le champ électrique [V/m]

II. 3. Les lois de comportement de milieu :

II.3.1 Relation diélectrique :

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$;

$\epsilon_0 = 1/36 \cdot \pi 10^{-9}$ [F/m]

ϵ_0 : la permittivité absolue de milieu

ϵ_r : la permittivité relative de milieu

II.3.2 Relation magnétique :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad [H/m]$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

\vec{B}_r : Le vecteur d'induction magnétique rémanente

μ_r : la perméabilité relative

Dans le vide :
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (\text{II.8})$$

μ_0 : La perméabilité du vide

II.3.3 relation électrique (loi d'Ohm) :

Quand un conducteur est soumis à un champ électrique, les charges électriques se mettent en mouvement (elles créent un courant électrique) [5], [8].

Son expression est donnée par :
$$\vec{J} = \vec{J}_s + \sigma \cdot \vec{E} + \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.9})$$

Avec :

\vec{J}_s : La densité du courant d'excitation de source [A/m^2]

$\sigma \cdot \vec{E}$: La densité des courants induits par la variation du champ électrique [A/m^2]

$\sigma(\vec{u} \wedge \vec{B})$: La densité des courants induits par mouvement [A/m^2]

\vec{u} : Vecteur des pièces conductrices susceptible de se déplacer [m/s]

σ : La conductivité électrique [S/m]

Dans les milieux homogènes et isotropes, on admet :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.10})$$

II.4. Le modèle magnétodynamique :

Les phénomènes électromagnétiques diffèrent selon le dispositif qu'on va étudier, ces phénomènes se découpent donnant naissance à des modèles, exemple : les modèles magnétostatique, les modèles magnétodynamique, les modèles électrocinétique,.....etc.

Dans notre étude on va s'intéresser au modèle magnétodynamique. Ce type de modèle s'applique au dispositif électromagnétique d'où les sources des tensions et des courants sont variables avec le temps [9], [5].

Dans le cas où le domaine contient des matériaux conducteur et la dynamique du champ est importante, l'effet des courants induits n'est plus négligeable ; dans ce cas il faut résoudre les équations associées à la magnétodynamique :

$$\overrightarrow{\text{Rot}}(\vec{E}) = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \neq \mathbf{0}$: les champs magnétiques et les champs électriques sont couplés par la présence des courants induits.

$$\text{Div}(\vec{B}) = \mathbf{0} \quad (\text{II.12})$$

On ajoute :

$$\text{Div}(\vec{J}_c) = \mathbf{0} \quad (\text{II.13})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.14})$$

II.5. hypothèse de simplification considérée pour l'étude de la machine asynchrone :

Tout modèle ou bien les phénomènes électromagnétiques se décrivent mathématiquement en utilisant des hypothèses de simplification qui satisfont les conditions de ce modèle ces hypothèses sont [5] :

- La densité volumique de charge est considérée nulle ($\rho = 0$) ; on l'applique sur les dispositifs qui possèdent 0 inductance.
- L'inductance magnétique rémanente est considérée nulle ($B_r=0$) ; on l'applique aux dispositifs qui possèdent pas des aimants permanents.
- $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ est prise généralement négligeable pour des basses fréquences.

II.6. Méthode des résolutions des équations :

Il y a plusieurs méthodes qui nous permettent de résoudre les équations de Maxwell qui sont : Analytiques, numériques, semi analytiques et mixtes , Ces méthodes ont

généralement été développées par des logiciels de modélisation pour faciliter le travail de conception.

II.6.1 Méthode numérique (MEF) :

Les méthodes de calcul par éléments finis est une méthode numérique utilisée pour résoudre les équations différentielles aux dérivés partielles des problèmes physique et elle est parmi les méthodes les plus utilisées à cause de son efficacité et sa précision en simulation [6], [7].

Cette méthode permet la détermination d'un champ scalaire ou vectoriel satisfaisant à un ensemble d'équation aux dérivées partielles et d'équation ordinaire en tout point du domaine d'étude et à tout instant, tout en respectant les conditions aux limites [5].

II.6.1.1 Types d'éléments finis :

Selon le domaine d'étude sont à une, deux ou trois dimensions, les éléments sont choisis en fonction du degré de la courbure d'interpolation qui leur associées [5]. La forme des éléments est liée à la dimension du problème (2D ou 3D). Pour des géométries en 2D on utilise des triangles ou des quadrilatères et pour les géométries en 3D on utilise des tétraèdres ou des hexaèdres [5].

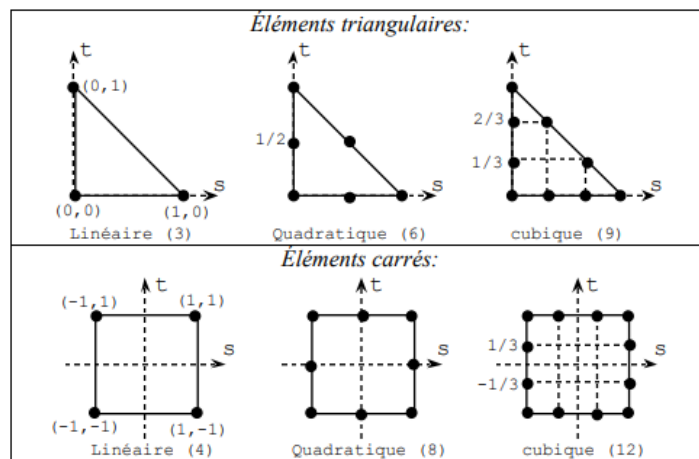


Figure II.1 : Types d'élément en 2D

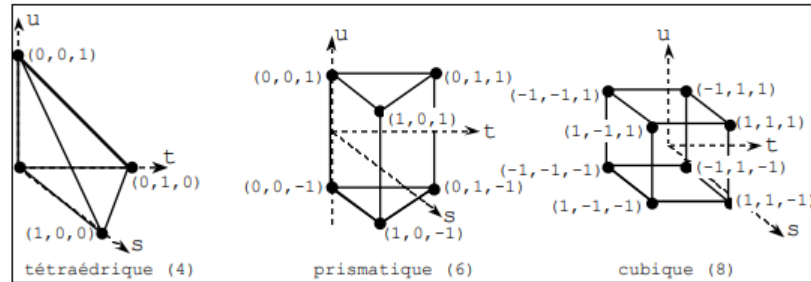


Figure II.2 : Types d'élément en 3D

II.6.1.2 Principe de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est basée sur la subdivision de la région étudiée en petites régions appelées éléments finis consistant en un maillage ou la subdivision ; est une étape très importante car la précision des résultats dépend de cette étape la finesse de cette subdivision en sous domaine. La solution est donnée en un ensemble de points finis qui sont les nœuds de la discrétisation. L'approximation de l'inconnu se fait en chaque élément grâce aux fonctions d'interpolation [5].

Pour les problèmes électromagnétiques, La méthode des éléments finis est associée avec la méthode des résidus pondérés ou la méthode variationnelle

- La méthode variationnelle : elle consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système à résoudre, pour la mise en œuvre de la méthode il faut suivre les étapes suivantes [6] :
 - Le maillage (discrétisation du domaine).
 - Choix de la fonction d'interpolation.
 - La minimisation de la fonctionnelle.
 - Résoudre du système algébrique.
 - Exploitation des résultats.
- Méthodes des résidus pondérés : le principe de cette méthode est remplacée la solution exacte par la solution approchée ce qui crée une erreur appelée résidu [7].

$$R_i = L(A) - f \quad (\text{II.15})$$

Avec :

R : résidu de l'approximation

L(A) : opérateur différentielle

f : fonction défini sur le domaine d'étude Ω

A : l'inconnu à chercher

II.6.1.3 conditions aux limites :

Elles sont imposées sur les frontières d'un dispositif qui délimite un système électromagnétique ; ces conditions seront imposées soit dans les frontières externes ou sur les frontières interfaces entre matériaux des propriétés différentes, on distingue deux types de condition aux milieux [5], [6].

a) condition Dirichlet :

L'inconnu prend des valeurs données sur les bords du domaine de résolution :

$$U = g_0 \quad (\text{II.16})$$

Avec :

U : variation de problème.

g_0 : valeur de l'inconnue sur la frontière.

On distingue deux types :

a.1) Dirichlet homogène :

Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite est considérée égale zéro ($A=0$)

a.2) Dirichlet non homogène :

Où l'inconnu est fixé sur la limite et ça valeur non nul $A \neq 0$

b) Condition de Neumann :

La valeur de gradient est connue sur les bords du domaine de résolution, Elle apparaît souvent sur les plans de symétrie.

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = h_0 \quad (\text{II.17})$$

Avec :

h_0 : constante ou zéro.

A : le potentiel vecteur magnétique.

On distingue deux types :

b.1) Condition Neumann homogène :

La dérivé par rapport a la normal de l'inconnu est nulle ; car les lignes iso-valeurs de l'inconnu sont perpendiculaire à la limite $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0$.

b.2) Condition Neumann non homogène :

Dans ce cas les lignes iso-valeurs ne sont pas perpendiculaires a la limite elles forment un angle avec cette dernière $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = h_0$.

c)Condition mixte Dirichlet et Neumann :

C'est la combinaison de deux conditions précédentes.

Avec :

$$aU + b \frac{\partial U}{\partial n} = h_0 \quad (\text{II.18})$$

n : normale à la frontière du domaine.

a, b : coefficient physique définis sur le domaine d'étude.

h_0 : constante.

Le calcul des pertes fers s'effectue à partir de l'induction magnétique B calculer par éléments finis, le logiciel calcul ces pertes on utilisant la relation suivante :

$$P_v = P_h + P_c + P_e = K_h f (B_m)^2 + K_c (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1.5} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

B_m : L'amplitude de la composante de flux

f : La fréquence

K_h : Le coefficient des pertes d'hystérésis

K_c : Le coefficient des pertes de courant de Foucault

K_e : Le coefficient des pertes de base excédentaire

II.6.2 Méthode analytique :

Les modèles analytique présentent l'avantage de pouvoir effectuer des calculs rapide, ils permettent d'explorer un large domaine de solutions pour converger vers une configuration optimale, elles sont employées à des géométries simple unidimensionnelles et parfois même

pour la résolution des problèmes bidimensionnelles. Le principe de la méthode analytique consiste à mettre l'inconnu sous forme d'un produit des fonctions dont chacun dépend d'un seul variable [5], [6], [7].

La grande partie des pertes fers se dissipe aux niveaux des dents et de la culasse statorique est pour calculer ces pertes on applique la méthode analytique et précisément la méthode de dimensionnement.

II.6.2.1 Les pertes dans la culasse statorique (P_{fcl}) :

Ces pertes est la multiplication de la masse d'acier de la culasse par les pertes spécifique calculées pour une induction B_{c1max} en introduisant le coefficient de majoration.

$$P_{fcl} = P_{10} \cdot (f_1/50)^\beta \cdot K_{dc} \cdot G_{c1} \cdot B_{c1}^2 [\text{W}] \quad (\text{II.20})$$

Avec:

$$P_{10} = 2.5 \text{ W/Kg}$$

f_1 : Fréquence du réseau d'alimentation

$\beta = 3/2$: coefficient de dilatation des tôles

K_{dc} : Coefficient total de majoration des pertes tenant compte de l'imperfection de la technologie

$K_{dc} = (1.3 \div 1.7)$; On le prend égale à 1.7

G_{cl} : Le poids total de la culasse, donné par la relation suivante :

$$G_{cl} = \pi(D_{ext} - h_{c1}) \cdot K_{fer} \cdot L_{cul} \cdot h_{c1} \cdot \gamma_c \cdot 10^{-9} \quad (\text{II.21})$$

D_{ext} : Diamètre extérieur

h_{c1} : Hauteur du dos du stator

K_{fer} : Coefficient de remplissage du paquet de tôles statorique

$K_{fer} = 0.95$: Pour l'isolation avec oxydation

$K_{fer} = 0.97$: Pour l'isolation avec verni, dans notre étude on applique celle-ci.

l_{cul} : Longueur de la culasse

$\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3 [Kg/m^3]$: Masse volumique

$$\text{Donc : } G_{cl} = 4.076 \text{ Kg}$$

B_{cl} : L'induction magnétique dans la culasse du stator, calculer en fonction de β_δ

$$B_{cl} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_p \cdot \beta_\delta}{K_{fer} \cdot h_{c1}} \quad (\text{II.22})$$

α_i : Coefficient de recouvrement polaire, donné par la relation suivante :

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} = 0.64$$

τ_p : Le pas polaire, donné par la relation suivante :

$$\tau_p = \left(\pi \cdot \frac{D_{int}}{2} \cdot P \right) = 87.449 \quad (\text{II.23})$$

β_δ : L'induction magnétique [Gauss], donné par la relation suivante :

$$\beta_\delta = \frac{0,225 \cdot 2 \cdot P \cdot U_s \cdot 10^6}{L_{cul} \cdot D_{int} \cdot W_1} \quad (\text{II.24})$$

Alors : L_{cul} et D_{int} en [cm], et 1Gauss = 10^{-4} Tesla

P : pair de pôles

U_s : La section simple [V]

D_{int} : Diamètre intérieur

W_1 : Nombre de spires par phase connecté en série

$$W_1 = \frac{N_s}{bob} \cdot N_{bob} = 64 \cdot 6 = 384 \text{ spires} \quad (\text{II.25})$$

N_s/bob : Nombre de spires de chaque bobine

N_{bob} : Nombre de bobine par phase

II.6.2.2 Les pertes dans les dents statorique :

Dans ces pertes on compte seulement à l'augmentation des pertes dues à l'usinage des dents et liées aux harmoniques supérieurs de l'induction [5]. Sont données par la relation suivante :

$$p_{fz1} = K_{dz} \cdot P_{10} \cdot \left(\frac{f^1}{50}\right)^\beta \cdot G_{z1} \cdot B_{z1max}^2 [W] \quad (II.26)$$

K_{dz} : Coefficient de majoration des pertes supplémentaire

$K_{dz} = (1.7 \div 1.8)$, on le prend à 1.8

G_{z1} : Le poids total des dents statorique, donné par la formule suivante :

$$G_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot L_{cul} \cdot K_{fer} \cdot Z_1 \cdot \gamma_c \cdot 10^{-9} [Kg] \quad (II.27)$$

Z_1 : Nombre d'encoche statorique

h_{z1} : Hauteur de la dent [mm], donné par :

$$h_{z1} = 0,5 \cdot (D_{ext} - D_{int}) - h_{c1} = 15.515 \text{mm} \quad (II.28)$$

b_{z1} : Largeur de la dent statorique=5,5[mm]

$G_{z1} = 2.06$ [kg]

B_{z1max} : Induction maximale dans la dent statorique, calculé par la relation suivante :

$$B_{z1max} = t_1 \cdot \beta_\delta / K_{fer} \cdot b_{z1} \quad (II.29)$$

t_1 : Pas dentaire, calculé par :

$$t_1 = \pi \cdot \frac{D_{int}}{Z_1} = 9.92 \text{ [mm]} \quad (II.30)$$

Donc le calcul des pertes dans les dents dépend de B_{z1max} , ou ce dernier dépend de β_δ et de la tension.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les lois fondamentales de la physique qui est les équations de MAXWELL qui nous permettent de reformuler les phénomènes électriques des différents dispositifs aux équations mathématique.

Pour étudié les pertes fer dans une machine asynchrone, il existe deux méthodes différentes ; soit la méthode numérique qui est la méthode des éléments finis ou bien la méthode analytique, on s'intéresse à la méthode des éléments finis qui nous donne une meilleur précision et on s'intéresse aussi à la méthode analytique et plus précisément à la méthodes de dimensionnement pour calculer les pertes fer dans le stator.

Dans le chapitre suivant nous posons le problème à résoudre dans le cadre de notre étude (calcul des pertes fer avec des méthodes différentes).

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre on va s'intéresser au calcul des pertes fer dans le stator creux car ces pertes dans cette partie sont importantes par rapport aux autres parties on va calculer ces pertes fer avec les différentes méthodes de résolution (la méthode de simulation avec le logiciel de Maxwell, la méthode analytique et l'approche expérimentale).

Les principales étapes de modélisation de la machine sont :

- La méthode analytique : il s'agit des solutions d'équation physique de la machine, cette méthode a plusieurs avantages comme sa rapidité et elle permet d'explorer maximum l'espace de solution dans un temps donné.
- La résolution avec élément finis en exploitant le logiciel Maxwell 14.0 elle nous permet de déterminer le potentiel vecteur et l'induction magnétique en tout point de la machine et par la suite permet de calculer les pertes fer.
- L'approche expérimentale qui est faite au niveau du laboratoire de construction des machines, qui consiste à varier la fréquence à l'aide d'un onduleur pour relever les puissances, les tensions et les courants, ces grandeurs nous permettent d'en déduire les pertes fer dans le stator.

Au final on fait une comparaison entre ces différentes méthodes.

III.2. Présentation de dispositif (stator creux avec bobinage) :

Le stator étudié provient d'une machine asynchrone triphasée à cage.

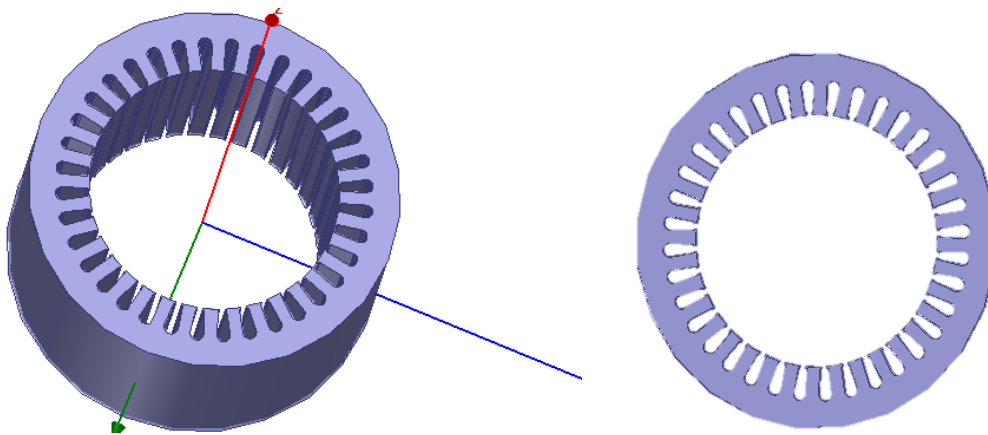


Figure III.1 : Vue de stator étudié en 2D et 3D sous Maxwell

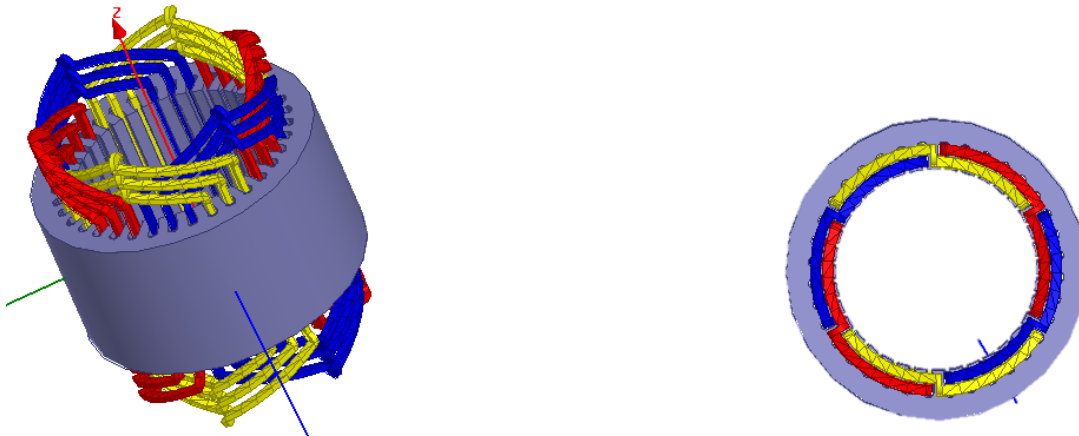


Figure III.2 : le stator et les trois enroulements concentriques en 3D

III.2.1 : paramètres de la machine étudiée (MAS à cage) :

Les dimensions principales et les paramètres de la machine étudiée sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : les paramètres de la machine à étudiée relevé avec le pied de coulisse

Paramètre	symbole	Valeur et unité
Nombre de conducteur par encoche	Nc	64
Fréquence	F	50Hz
Nombre d'encoche statorique	Z1	36
Nombre de paires de pôles	P	2
Diamètre interne de stator	Dint	113.75mm
Diamètre externe de stator	Dext	169.45mm
Longueur de la machine	L	90.4mm
Hauteur d'ouverture d'encoche	Hs0	1mm
Hauteur de cale de l'encoche	Hs1	0mm
Hauteur de l'encoche statorique	Hs2	11.435
Largeur de bas d'encoche	Bs2	6.16mm
Largeur maximale de la cale d'encoche	Bs1	4mm
Largeur d'ouverture d'encoche	Bs0	2.8mm
Epaisseur de tôle	Et	0.3mm

III.2.2.Présentation du bobinage concentrique :

D'une façon globale, Le bobinage concentrique est destiné pour les applications de grande puissance, où un nombre important de paires de pôles est nécessaire. Ce type de bobinage permet d'éviter les courts circuits entre les trois bobines, ce qui simplifie la construction du statorique est représenté sur la figure III.3.

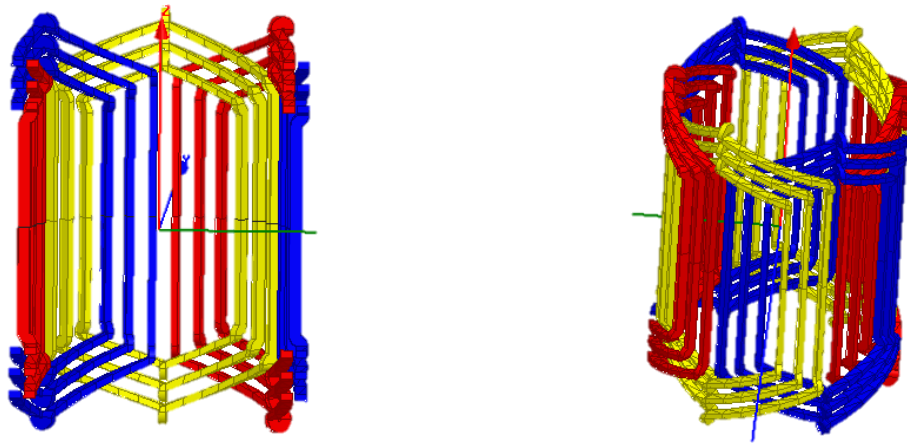


Figure III.3 : bobinage concentrique d'une MAS sous Maxwell

Les paramètres utilisés pour réaliser le bobinage de la machine asynchrone à cage d'écureuil sont donnés au tableau suivant :

Tableau III.2.les paramètres bobinage concentrique d'une MAS

Paramètres	Symboles	Valeur et unité
Nombre de bobine totale	Nbt	6 bobines
Nombre d'enroulement	Ne	3 enroulements
Nombre de section totale	Nst	18 sections
Pas angulaire	Y1	9 encoches
Nombre de pôle	2p	4 pôles
Nombre d'encoche	Z1	36 encoches

Le couplage des bobines du stator en étoile (Y)

III.3 : calcul des performances par élément finis :

III.3.1 : exploitation du logiciel Maxwell 14.0 :

Le logiciel Maxwell est basé sur la méthode des éléments finis, il est conçu pour résoudre les problèmes électromagnétiques.

Les étapes nécessaires pour résoudre un problème sous Maxwell :

- Choisir le type du modèle à étudier (magnéto magnétiques, électrostatique ou magnétodynamique), dans notre cas on a étudié notre dispositif en magnétodynamique.
- Choisir le plan de travail, notre plan de travail est en coordonnées cartésiennes [x, y, z] en 3D.
- Introduire les différents paramètres des parties du dispositif pour tracer la géométrie à étudier (stator et différentes bobines).
- Affecter les matériaux pour les parties de la machine, dans notre cas le stator est ASEMETALS M19_29G (voir annexe A), pour les bobines on a choisi le cuivre et pour la région c'est de vide.
- Affecter les conditions aux limites du domaine étudié, on applique les conditions Dirichlet (3D).
- Affecter les sources de courant ou bien des tensions dans notre cas on a excité les bobines avec une tension car les pertes fers dépendent de cette dernière.
- Affecter le maillage pour la partie d'étude.
- Choisir les grandeurs à calculer (calcul des pertes fers).
- Analyse des étapes précédentes.
- Lancer la résolution.
- Exploiter les résultats.

Pour la simulation de notre dispositif (stator) on doit exciter les trois phases avec les tensions qui leur correspondent, les trois phases sont décalées de 120° l'une de l'autre.

On excite les trois phases avec la même tension car notre stator est couplé en étoile.

Les équations injectées pour la simulation sont :

$$\text{Phase A: } 67.5 \cdot \sqrt{2} \cdot (1 - \exp(-50 \cdot \text{time})) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time})$$

$$\text{Phase B: } 67.5 \cdot \sqrt{2} \cdot (1 - \exp(-50 \cdot \text{time})) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} - 2 \cdot \pi / 3)$$

$$\text{Phase C: } 67.5 \cdot \sqrt{2} \cdot (1 - \exp(-50 \cdot \text{time})) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + 2 \cdot \pi / 3)$$

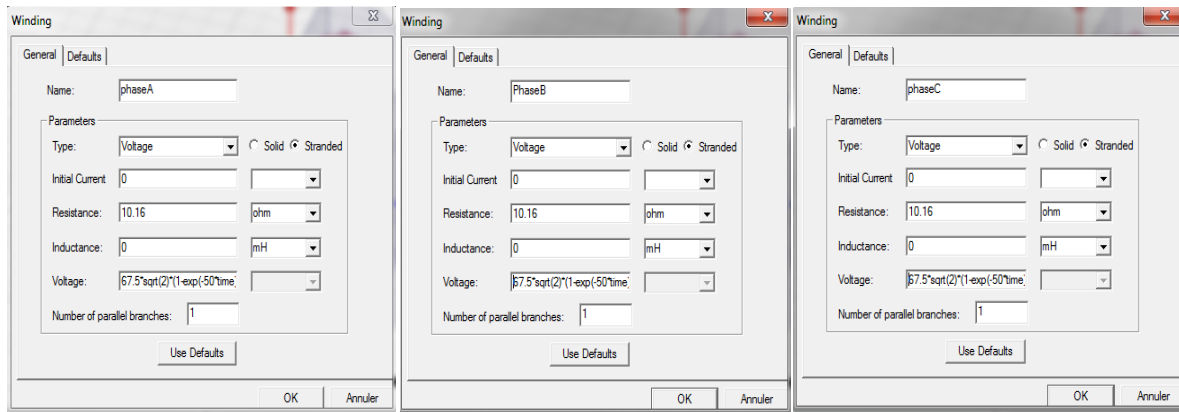


Figure III.4 : excitation des trois phases

Après avoir terminé la simulation de notre dispositif par élément fini qui nous permet de calculer le potentiel vecteur en chaque nœud du maillage. On a obtenu des résultats qui nous permettent de visualiser le niveau l'induction magnétique B et le maillage.

III.3.2 : le maillage :

On s'intéresse aux calculs des pertes dans le stator, alors on fait le maillage dans cette partie.

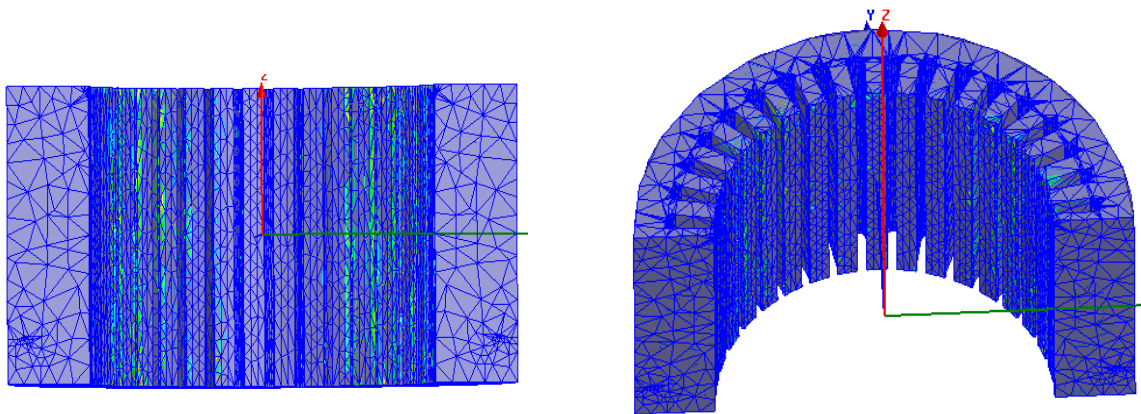
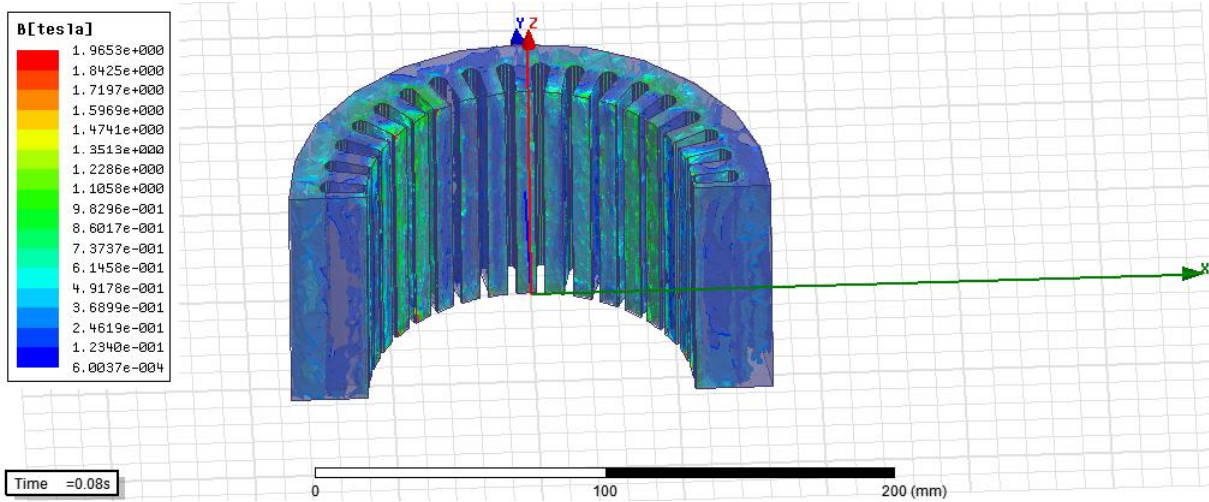


Figure III.5 : Le maillage d'une demi-coupe du stator en 3D

III.3.3: visualisation de l'induction magnétique

Pour un pas de calcul $t_1 = 0.08$ s



Pour un pas de calcul $t_2 = 0.05$ s

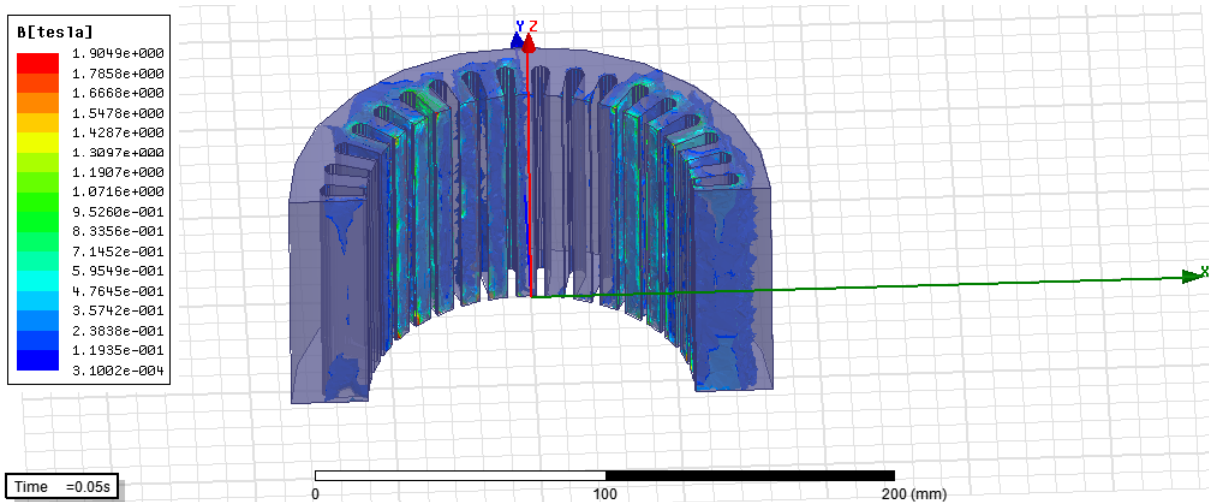


Figure III.6 : La distribution de l'induction magnétique dans le stator

III.3.4 : visualisation du courant est la tension des bobines du stator

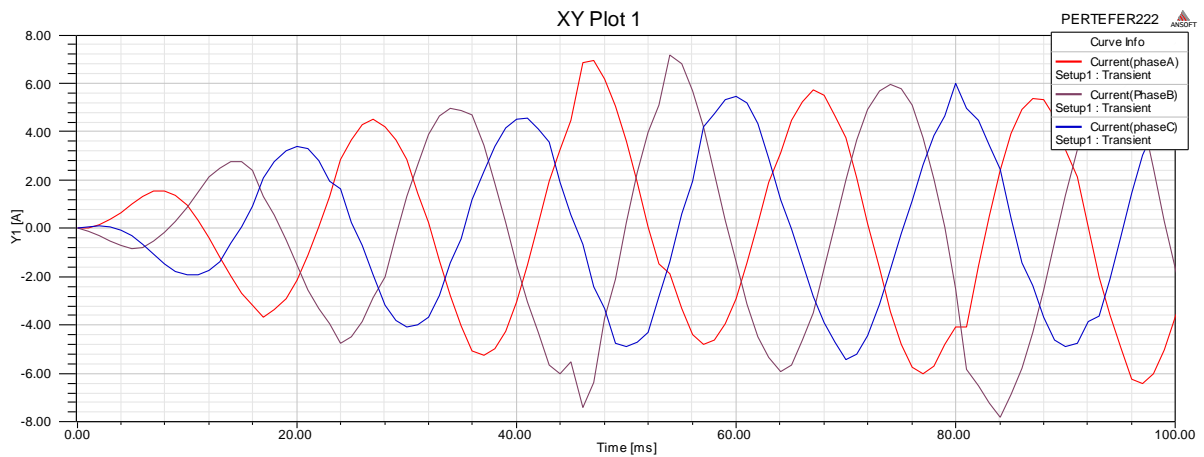


Figure III.7 : Les courants des phases statorique

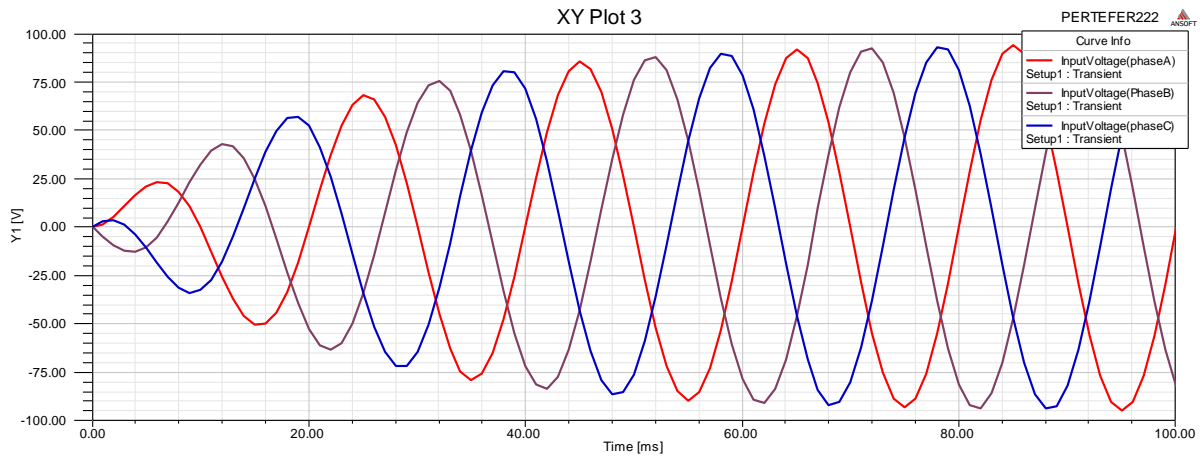


Figure III.8 : Les tensions de phase du stator

D’après les courbes obtenues on voit bien que les courants et les tensions sont tous les deux sinusoïdale avec une période de 20 ms

On peut visualiser les pertes fers qui sont calculé par le logiciel Maxwell on utilisant la relation (II.19)

III.3.5 : visualisation des pertes fers

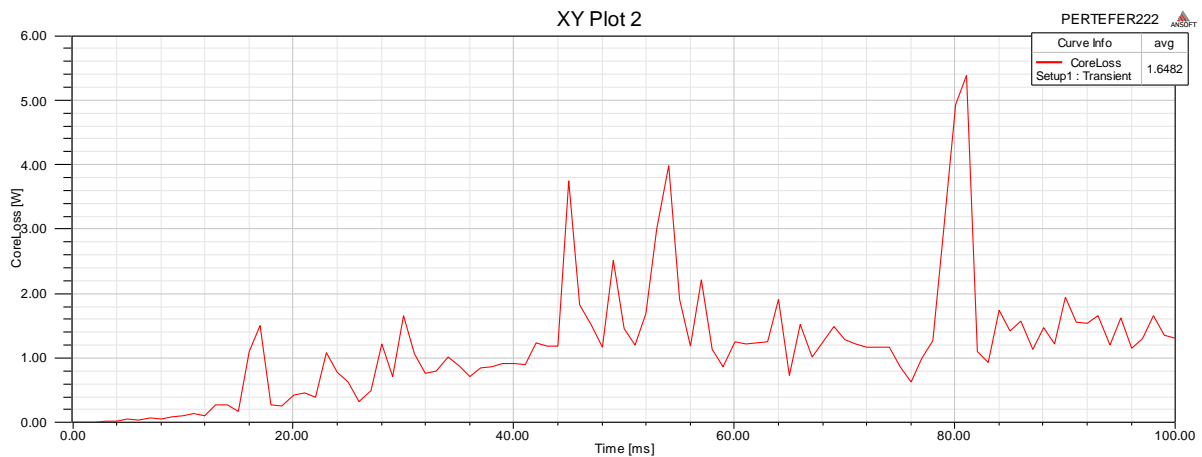


Figure III.9 : évaluation des pertes fers dans le stator

Les pertes fer égale à 1.64 [W].

III.4.Travail effectué au laboratoire (expérimental) :

On a fait ce travail au laboratoire de construction de machine électrique FGEI UMMTO avec des matériaux qui existe pour estimer les pertes fer à l’aide des paramètres quand va relever. On a besoin de mesuré le courant I, la tension V, la résistance R et la puissance P.

La loi utilise pour calculer les pertes fer est :

$$P_{fer} = P_a - P_{js} \quad (III.1)$$

Avec :

P_a : La puissance absorbée en W

P_{js} : Les pertes joules statoriques et donné par :

$$P_{js} = 3RI^2 \quad (III.2)$$

Ce travail est réalisé en deux méthodes différentes, la première on a alimenté un stator creux avec un variateur de fréquence, la deuxième avec une source de tension.

A l'aide d'un ohmmètre de précision, On a mesuré les résistances des trois phases à chaud :

$r_{phA} = 10.2\Omega$ la résistance de la phase A

$r_{phB} = 10.2\Omega$ la résistance de la phase B

$r_{phC} = 10.1\Omega$ la résistance de la phase C

$R = (r_{phA} + r_{phB} + r_{phC}) / 3 = 10.16\Omega$ la résistance moyenne

III.4.1.essai avec un variateur de fréquence (onduleur) :

Pour cet essai on réalise le schéma suivant :

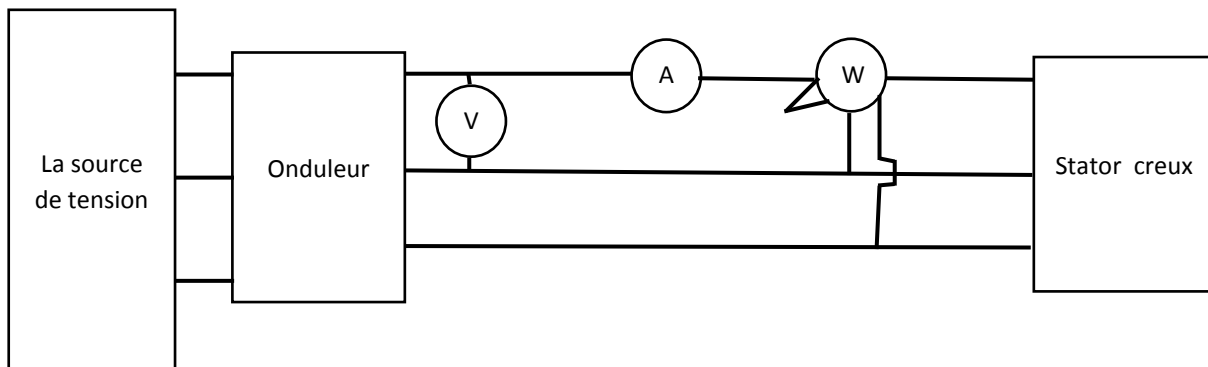


Figure III.10 : Schéma de montage d'un stator alimenter par un onduleur

➤ Le matériel utilisé :

- La source
- Onduleur
- Voltmètre
- Ampèremètre
- Wattmètre



Figure III.11: photo de banc d'essai pour mesuré les pertes fers (avec onduleur)

Les valeurs relevées après la réalisation du montage :

Tableau III.3 : les valeurs mesurée (avec onduleur)

I(A)	P(W)	U(V)	f(HZ)
0.5	9	200	0.85
1	48	220	1.75
1.45	72	245	2.95
1.9	126	270	4.1
2.4	198	280	5.3
2.9	288	290	6.6
3.5	414	305	8
3.95	531	315	9.65
4.4	675	330	11.35
4.9	900	335	13.35

III.4.2 : Stator alimenté directe par la source (sans onduleur)

Dans cette expérience on a alimenté le stator creux directement par la source triphasée avec une fréquence constante (50HZ), en varié le courant d'excitation de (1[A]) jusqu'à ce qu'on atteint (4[A]) pour relever la tension, la puissance et les résistances concernons toutes les points mesurés.

- le matériel utilisé :
 - La source
 - Voltmètre
 - Ampèremètre

- Wattmètre

Cette expérience est donnée par le schéma suivant :

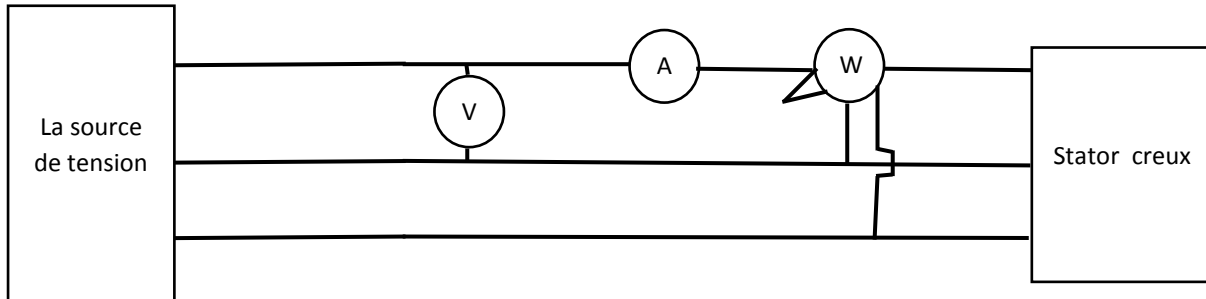


Figure III.12 Schéma de montage d'un stator alimenté par une source de tension

Les valeurs relevées après la réalisation du montage :

$F=50\text{hz}$

Les résistances mesurées à froid :

$R_a=10.9 \Omega$; la résistance de la phase A

$R_b= 9.1 \Omega$; la résistance de la phase B

$R_c= 9.3\Omega$; la résistance de la phase C

Les valeurs mesurées avec des résistances à chaud représenté au tableau ci-dessous :

Tableau III.4 : les valeurs mesuré

I (A)	P (W)	V (V)	R_a (Ω)	R_b (Ω)	R_c (Ω)	R_m (Ω)
4	498	66	10.8	9.8	10	10.2
3.5	393	57.5	10.9	10	10.2	10.1
3	294	50	11.2	10	10.3	10.5
2.5	192	42	10.8	9.7	9.9	10.13
2	123	33.5	10.8	9.7	9.9	10.13
1.5	66	25	10.7	9.7	9.9	10.1
1	30	16.5	10.6	9.5	9.8	9.96

Il faut noter que ces résultats peuvent avoir des erreurs dues aux mauvaises lectures car les appareils utilisés au laboratoire ne sont pas assez fiables. Il y a des graduations qui ne peuvent pas fixer les valeurs exactes pendant la lecture et précisément le wattmètre car chaque graduation de celui-ci est multipliée par un facteur de multiplication ce qui nous donne d'éventuelles erreurs.

III.5 : résultats de calcul des pertes fers avec les différentes méthodes :

III.5.1 : résultat de la méthode analytique :

On applique cette méthode qu'on appelle la méthode de dimensionnement pour calculer les pertes fers avec les relevés qu'on a fait du stator étudié au laboratoire, et pour calculer ces pertes on va utiliser les relations qu'on a représenté dans le deuxième chapitre.

Première relation : c'est celle qui nous donne les pertes fers dans la culasse statorique (P_{fcl} II.20)

Deuxième relation : c'est celle qui nous donne les pertes fers dans les dents statorique (P_{fzl} II.26)

Tableau III.5 : Les relevées du stator

Les dimensions géométriques de la tôle statorique	Valeur numérique en [mm]
L_{cul}	90.4
D_{int}	113.75
h_{c1}	12.335
D_{ext}	169.45

Avec : pair de pôle $p=2$

La fréquence de réseau d'alimentation est : $f=50$ Hz

On prend la tension simple $U_s=67.5$ v car on a fait un seul essai, alors les résultats obtenus sont illustrés dans les tableaux suivants :

Tableau III.6 : les résultats de calcul des pertes dans la culasse avec la méthode analytique :

La tension appliquée[V]	67.5
β_δ	0.154
B_{cl}	0.37
P_{fcl}	2.37

Tableau III.7 : Les résultats de calcul des pertes dans la dent statorique avec la méthode analytique :

La tension[V]	67.5
B_{z1max}	0.29
P_{fzl}	0.78

Enfin, les pertes fers sont données par la somme des pertes dans la culasse et dans les dents statorique comme le montre le tableau suivant :

Tableau III.8 : Le résultat final des pertes avec le calcul de dimensionnement (analytique) :

La tension [V]	67.5
P_{fer} [W]	03.15

III.5.2 : résultats de la méthode expérimentale :

Pour cette méthode, on a calculé les pertes fers de notre dispositif (stator) avec les mesures relevées au laboratoire on utilisant la relation (III.1).

Donc on aura les résultats suivant :

Tableau III.9 : Les résultats de calcul des pertes fers pour l'essai avec onduleur

I(A)	P(W)	U(V)	f(HZ)	Pfer
0.5	9	200	0.85	1.17
1	48	220	1.75	16.71
1.45	72	245	2.95	6.21
1.9	126	270	4.1	13.04
2.4	198	280	5.3	17.76
2.9	288	290	6.6	24.85
3.5	414	305	8	30.69
3.95	531	315	9.65	42.79
4.4	675	330	11.35	69.22
4.9	900	335	13.35	148.72

Interprétation :

A partir du tableau en remarque que les pertes fers augmentent avec l'augmentation de la fréquence donc sont proportionnelles, alors il y a une forte dépendance entre les pertes fers et la fréquence.

Tableau III.10 : Les résultats de calcul des pertes fers avec alimentation directe du réseau (f=50Hz)

I (A)	P (W)	V (V)	Ra (Ω)	Rb (Ω)	Rc (Ω)	Rm (Ω)	Pfer(w)
4	498	66	10.8	9.8	10	10.2	5.4

3.5	393	57.5	10.9	10	10.2	10.1	15.82
3	294	50	11.2	10	10.3	10.5	10.5
2.5	192	42	10.8	9.7	9.9	10.13	2
2	123	33.5	10.8	9.7	9.9	10.13	1.4
1.5	66	25	10.7	9.7	9.9	10.1	0.82
1	30	16.5	10.6	9.5	9.8	9.96	0.1

A partir du tableau on remarque qu'à chaque fois qu'on fait augmenter le courant d'excitation les pertes fers statorique augmentent avec.

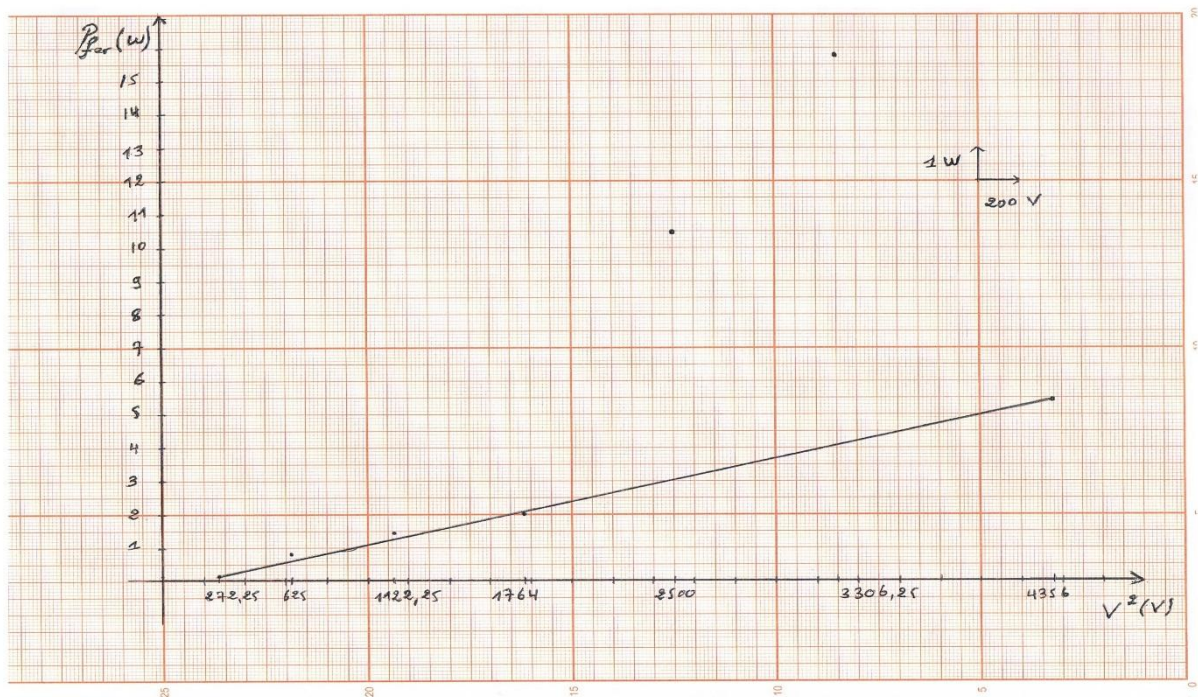


Figure III.13 : les pertes fers en fonction de la tension au carré ($P_{fer} = f(V)^2$)

On remarque de la figure traditionnelle que les pertes fers sont proportionnel à la tension au carré.

III.6 : Les résultats finals

Après la description détaillée des trois méthodes, on peut résumer les résultats comme suit :

Pour une attaque directe par la source $f=50\text{Hz}$

Tableau III.11 : Les résultats des trois méthodes

La tension U [V]	67.5
P_{fer} analytique [W]	3.15
P_{fer} expérimentale [W]	5.4
P_{fer} simuler [W]	1.61

Interprétation des résultats :

A partir du tableau on remarque que les valeurs des pertes fers qu'on trouve avec les trois méthodes (Pfa, Pfe, Pfs) sont très proches, les erreurs existes revient à la lecture sur les appareils de mesure et beaucoup plus le wattmètre et les mesures relevée de la géométrie du stator, ces erreurs influence sur la méthode de dimensionnement et l''expérimentalement, mais les trois méthodes Mènes presque aux mêmes grandeurs.

Les deux méthodes analytique et expérimentale ne prend pas beaucoup de temps de calcul par contre la méthode de simulation prend un temps de calcul important.

Conclusion

Dans ce chapitre on a calculé les pertes fers de notre dispositif qui est le stator creux d'une machine asynchrone a cage d'écureuil et on a visualisé la tension et le courant et aussi les lignes de champ et l'induction magnétique.

On est arrivé au résultat des trois méthodes de calcul qui sont la méthode de simulation, la méthode analytique et expérimentale.

En effet, nous avons déterminé qu'il y a une forte dépendance entre les pertes fers et la fréquence de l'alimentation. En effet, lorsque on augmentant la fréquence les pertes fers augmente. On a constaté également que le calcul des pertes fers avec les trois méthodes donne presque le même résultat.

Conclusion générale

Au cours de ce travail, nous nous sommes intéressés au calcul des pertes fers dans le stator d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

Après avoir donné les généralités de la machine asynchrone, à savoir ; les différents composants et son principe de fonctionnement, les différentes pertes existantes ainsi que les équations régissant le modèle magnétodynamique de la machine, on s'est intéressé aux calculs des pertes fers en utilisant trois différentes méthodes :

-la méthode analytique ou de dimensionnement, cette méthode est basée sur l'application des équations physiques en utilisant les résultats de mesure et de relevé obtenus au laboratoire lors de la manipulation.

-la deuxième méthode issue de l'approche expérimentale, avec cette méthode on 'a relevé la puissance absorbée pour les deux essais (fréquence variable et fréquence constante) et avec un simple calcul on 'à calculer les pertes fers du stator creux.

-la dernière méthode est la méthode de simulation, qui consiste on application des éléments finis en utilisant le logiciel Maxwell 14.0, ce logiciel permet de calculer l'induction magnétique pour l'évaluation des pertes.

On remarque que les résultats obtenus par les trois méthodes de calcul sont presque les même ils ont le même ordre de grandeurs et on 'a aussi constaté qu'il y a une forte dépendance entre les pertes fers et la fréquence.

Ce travail peut se complété en faisant des calculs des pertes fers pour différentes fréquences avec la méthode analytique et la méthode des éléments finis

Bibliographie

- [1] ASMANE TABOU. MENAD OUGHACHA « Evaluation des pertes fer dans une machine asynchrone a cage ». Mémoire de fin d'études de master académique U.M.M.T.O 2016.
- [2] KAHINA CHAIR. LYNDA SADI HADDAD. « Etudes et estimation des pertes fer dans une machine asynchrone a cage ». Mémoire de fin d'études de master académique U.M.M.T.O 2015
- [3] MOUSSA SEKOUR, AMMAR NEMMAR<<estimation des pertes supplémentaire engendrée par un convertisseur de fréquence dans un moteur asynchrone a cage>>. Mémoire de fin d'étude de master académique U.M.M.T.O, 2014.
- [4] AIGOUN ABDELLAH, AMRANE SAID<<étude des pertes d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil>>,DEUA.2010.
- [5]. BOUKHARI Bylia, AMINI Taous <<calcul des pertes fer dans la machine asynchrone >>, mémoire de fin d'étude de master académique, 2017, université UMMTO.
- [6]. Mr. HAMADOU Adil, Mr. NESSISSEN Abdelkader << modélisation numérique d'un moteur asynchrone a cage d'écureuil >>, mémoire du projet de fin d'étude, 2015, université Djilali bounaama khemis Miliana.
- [7]. KHEBBAB Mohamed << étude de capteur a courant de Foucault pour contrôle non destructif (CND) >> mémoire présentée en vue de d'obtention de diplôme de magister en électrotechnique, 2017, université MENTOURI de Constantine.
- [8].MOURAD HELLAL, SALIM RAMDANE <<étude des performances de la machine asynchrone sous défauts>>, mémoire de fin d'étude de master académique,2017, université UMMTO.
- [9]. Communication technique, leçon 6 << le moteur asynchrone>>.
- [10]. Thierry Gautreau<<estimation des pertes fer dans les machines électrique modèle d'hystérésis loss surface et application aux machines a aimants>>.thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'INPG, 2005.
- [11]. DAMECH ZAKARIA, MOKHTARI BRAHIM<< modélisation et simulation d'une generatrice asynchrone en saturation>>, mémoire de fin d'étude de master.2011/2012, université de kasdimerbah-ouargla.
- [12]. Thierry CHEVALIER<< modélisation et mesure des pertes fers dans les machines électrique application à la machine asynchrone>>, thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DEL'INPG, 1999.

Notice d'utilisation de logiciel Maxwell

Le logiciel maxwell permet de résoudre des problèmes magnétique et électrique, pour faire l'étude d'un dispositif avec ce logiciel on doit faire les étapes suivantes :

- Pour accéder au logiciel on clique sur l'icône suivante :



Figure A1 : icône de programme

Après avoir lancé le programme, une fenêtre par défaut affiche

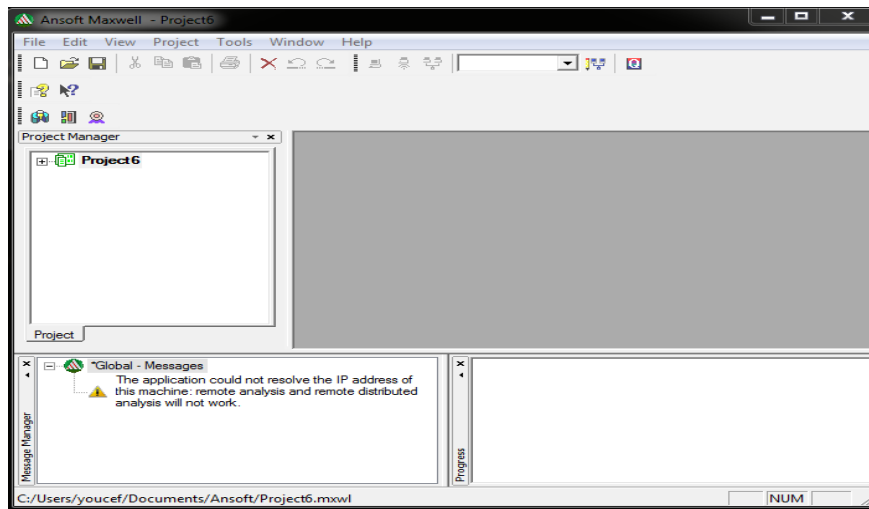



Figure A2 : une fenêtre vide avec une barre de menu minimale

- Choisir le type de Maxwell à étudier par :
 - Sélectionner l'un des icônes pour accéder au Maxwell 2D ou 3D respectivement 
 - Ou bien par projet de la barre de menu

Après avoir ce choix une autre fenêtre affiche avec une barre détaille

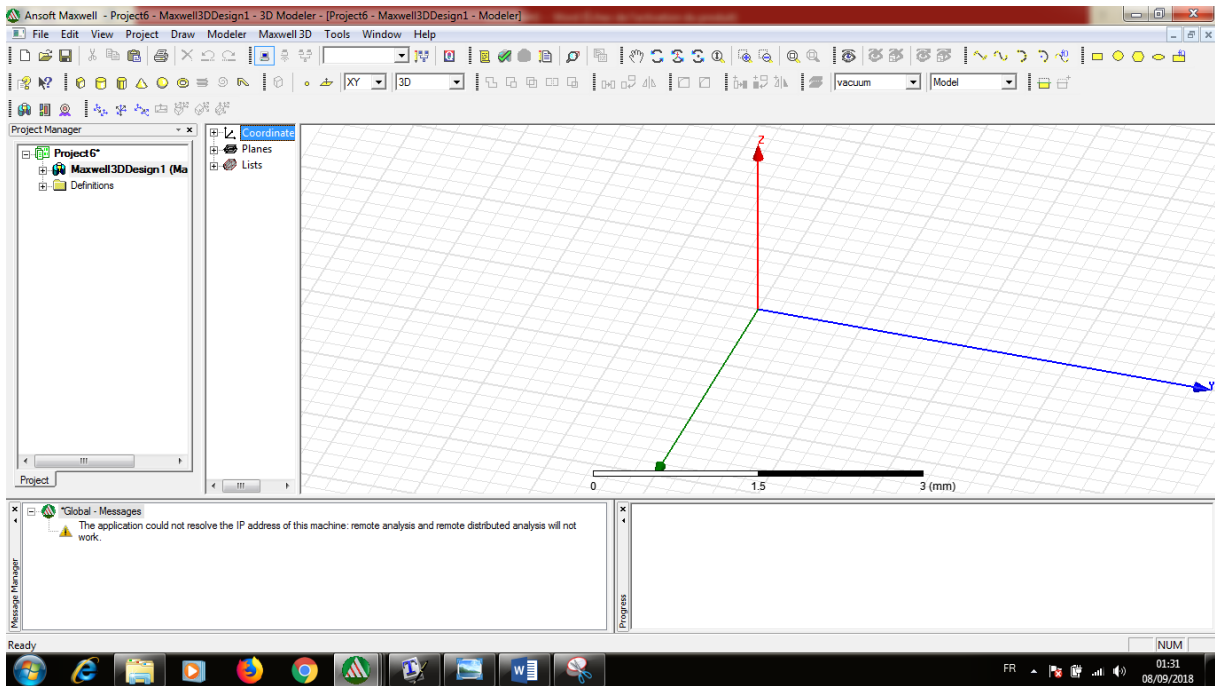


Figure A3 : fenêtre représente un plan d'étude de notre dispositif avec toutes les fonctions de besoin

- Le domaine d'étude : existe plusieurs domaines d'étude, on les sélectionne à partir de Maxwell 3D/2D → solution type

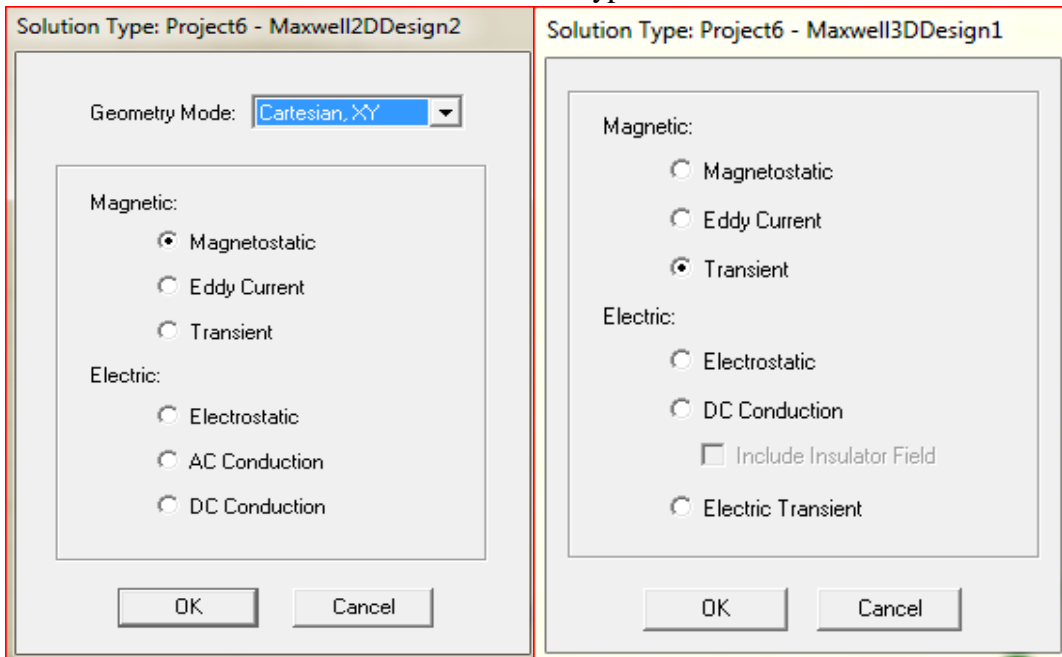


Figure A4 : les domaines en 2D

Figure A5 : les domaines en 3D

Dans notre cas on étudie le magnetic : transient (magnétodynamique)

➤ **La géométrie étudiée**

Dans ce logiciel on peut étudier n'importe quelle géométrie, et pour notre cas de la machine on suit les étapes suivantes :

- Pour le stator : Draw → User → Defined primitive → syslib → slot core

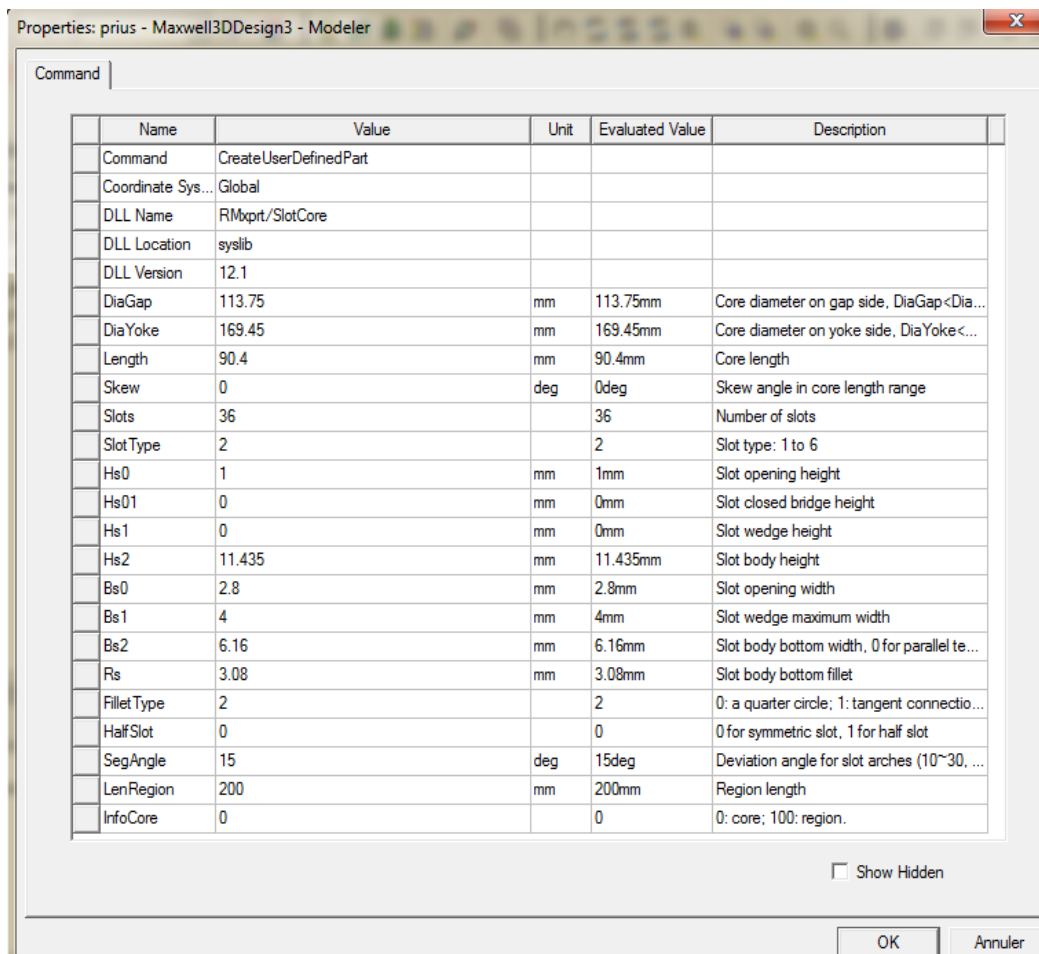


Figure A.6 : les paramètres du stator

- Pour les bobines : Draw → User → Defined primitive → syslib → Lap coil

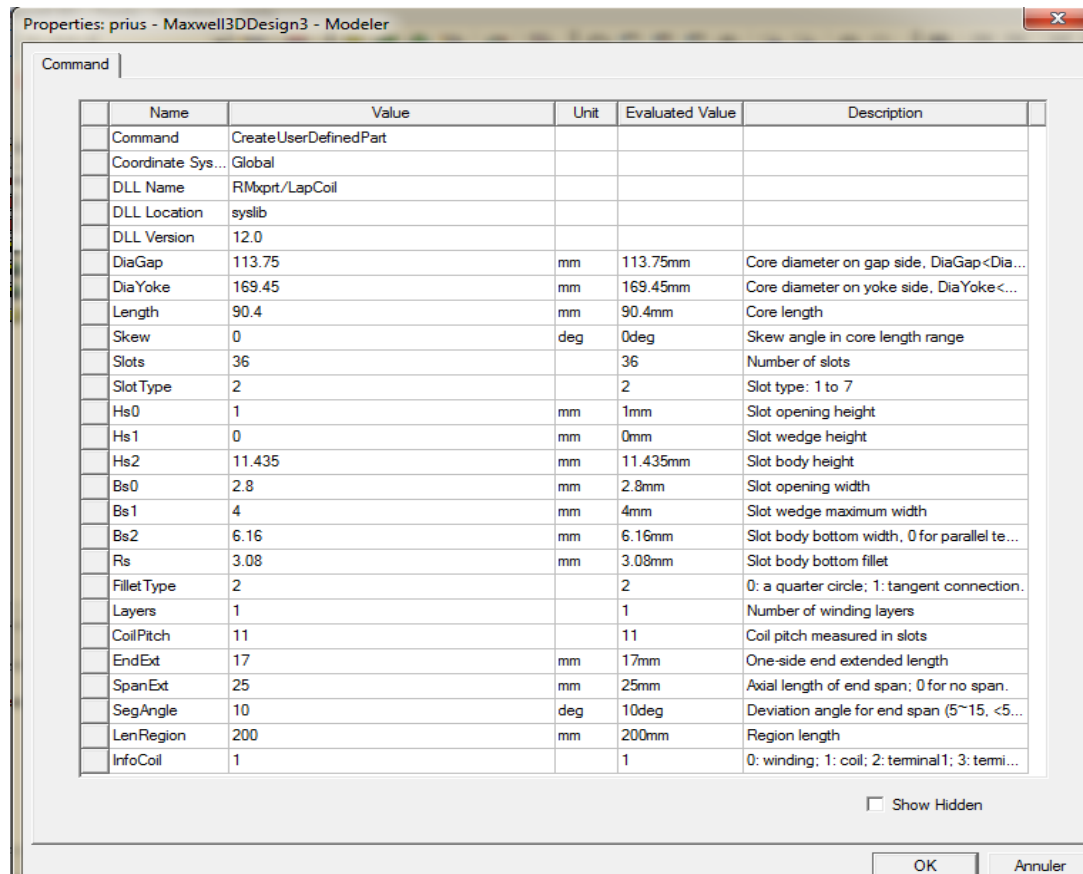


Figure A.7 : Les paramètres du bobinage

- Pour la région :

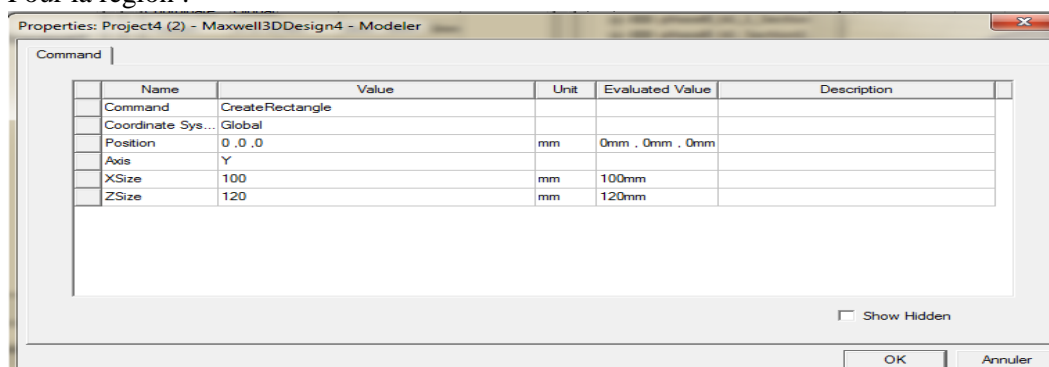


Figure A.8 : les paramètres de la région

➤ **Affectations des matériaux :**

La bibliothèque de logiciel a des types de matériaux qu'on peut directement le prend selon le besoin, et dans notre cas on ajoute un autre matériau selon les étapes suivantes :

Sélectionner le stator → bouton droit → Assign matériel → View/Edit Materials → affiche une fenêtre ou on introduit les paramètres.

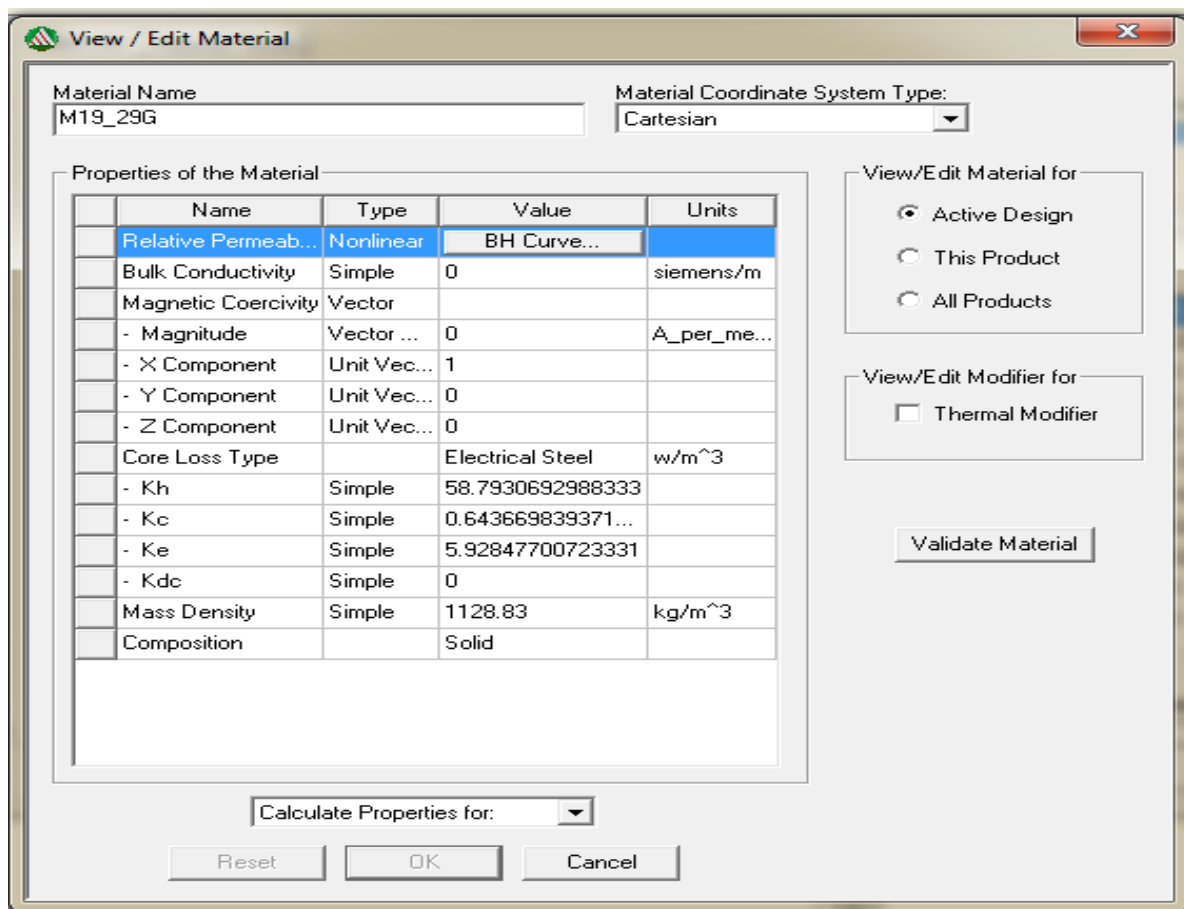


Figure A.9 : propriétés de matériau ajouté

Dans cette colonne on va introduit les valeurs de B(H) à partir de fichier rapport de mesure



RAPPORT DE MESURE

ECHANTILLON : H025 12		jeudi 26 avril 2012	
Masse active : 0,9864 Kg	Section utile : 1,3453 cm ²	Température : 25,0 °C	
F : 50,0 Hz	N1 : 700	N2 : 700	Lm : 0,9400 m
Observations : Produit ASE METALS M800-50A			

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	Ss (VA/Kg)	µa
1,797	8,060 e+3	8,360 e+0	1,682 e+2	1,774 e+2
1,760	6,333 e+3	7,560 e+0	1,285 e+2	2,212 e+2
1,722	4,869 e+3	7,340 e+0	9,497 e+1	2,814 e+2
1,684	3,654 e+3	7,110 e+0	6,828 e+1	3,667 e+2
1,646	2,856 e+3	6,800 e+0	4,842 e+1	4,932 e+2
1,609	1,939 e+3	6,520 e+0	3,456 e+1	6,603 e+2
1,573	1,420 e+3	6,240 e+0	2,484 e+1	8,815 e+2
1,536	1,039 e+3	5,950 e+0	1,833 e+1	1,176 e+3
1,499	7,740 e+2	5,650 e+0	1,396 e+1	1,541 e+3
1,463	5,953 e+2	5,327 e+0	1,105 e+1	1,956 e+3
1,425	4,652 e+2	5,038 e+0	9,008 e+0	2,438 e+3
1,389	3,803 e+2	4,775 e+0	7,705 e+0	2,906 e+3
1,353	3,190 e+2	4,523 e+0	6,720 e+0	3,375 e+3
1,316	2,725 e+2	4,288 e+0	5,977 e+0	3,843 e+3
1,279	2,363 e+2	4,065 e+0	5,412 e+0	4,307 e+3
1,243	2,092 e+2	3,857 e+0	4,943 e+0	4,728 e+3
1,206	1,873 e+2	3,656 e+0	4,548 e+0	5,124 e+3
1,170	1,709 e+2	3,461 e+0	4,227 e+0	5,448 e+3
1,134	1,570 e+2	3,273 e+0	3,929 e+0	5,748 e+3
1,097	1,470 e+2	3,089 e+0	3,650 e+0	5,939 e+3
1,060	1,421 e+2	2,904 e+0	3,416 e+0	5,936 e+3
1,024	1,370 e+2	2,732 e+0	3,192 e+0	5,948 e+3
0,987	1,340 e+2	2,564 e+0	2,991 e+0	5,861 e+3
0,950	1,317 e+2	2,395 e+0	2,891 e+0	5,740 e+3
0,914	1,287 e+2	2,248 e+0	2,715 e+0	5,651 e+3
0,877	1,264 e+2	2,104 e+0	2,554 e+0	5,521 e+3
0,841	1,234 e+2	1,968 e+0	2,396 e+0	5,423 e+3
0,805	1,221 e+2	1,841 e+0	2,257 e+0	5,246 e+3

ECHANTILLON : H025 12	jeudi 26 avril 2012
-----------------------	---------------------

B (Tesla)	H (A/m)	Ps (W/Kg)	Ss (VA/Kg)	Ss (VA/Kg)
0,760	1,201 e+2	1,715 e+0	2,117 e+0	5,095 e+3
0,732	1,177 e+2	1,591 e+0	1,977 e+0	4,849 e+3
0,695	1,155 e+2	1,475 e+0	1,847 e+0	4,795 e+3
0,660	1,126 e+2	1,369 e+0	1,716 e+0	4,652 e+3
0,622	1,115 e+2	1,259 e+0	1,597 e+0	4,439 e+3
0,587	1,094 e+2	1,145 e+0	1,478 e+0	4,270 e+3
0,550	1,069 e+2	1,040 e+0	1,360 e+0	4,054 e+3
0,513	1,040 e+2	9,361 e-1	1,266 e+0	3,925 e+3
0,477	1,014 e+2	8,389 e-1	1,148 e+0	3,743 e+3
0,441	9,960 e+1	7,460 e-1	1,039 e+0	3,523 e+3
0,404	9,620 e+1	6,543 e-1	9,272 e-1	3,342 e+3
0,367	9,360 e+1	5,672 e-1	8,207 e-1	3,126 e+3
0,332	9,140 e+1	4,857 e-1	7,245 e-1	2,891 e+3
0,295	8,910 e+1	4,065 e-1	6,302 e-1	2,635 e+3
0,259	8,540 e+1	3,310 e-1	5,338 e-1	2,413 e+3
0,223	8,240 e+1	2,625 e-1	4,477 e-1	2,154 e+3
0,186	7,890 e+1	1,979 e-1	3,702 e-1	1,879 e+3
0,149	7,440 e+1	1,404 e-1	2,849 e-1	1,594 e+3
0,114	6,890 e+1	9,130 e-2	2,071 e-1	1,317 e+3
0,077	6,130 e+1	5,110 e-2	1,355 e-1	9,996 e+2
0,040	4,560 e+1	2,210 e-2	7,181 e-2	6,430 e+2
0,004	3,120 e+1	5,300 e-3	2,239 e-2	1,020 e+2
0,000	1,000 e+1	1,000 e-4	7,000 e-6	0,000 e+0

VETINER ESSAI H025 12.Td

2

Figure A.10 : les valeurs du B(H)

On obtient la courbe suivante :

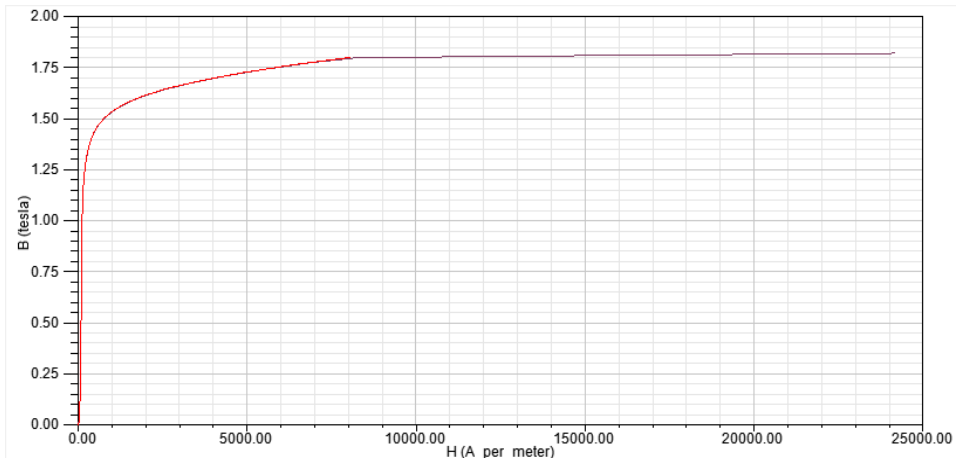


Figure A.11 : évaluation de B(H)

Les bobines : les mêmes étapes que le stator et le matériau, ce dernier on va le sélectionné directement de la bibliothèque, c'est le Copper (cuivre)

La région : les mêmes que avant, le matériau est le vacuum (vide)

➤ **Condition aux limites (boundaries)**

On applique les conditions aux limites selon le dispositif, dans notre cas en 3D on a pris par la moitié de dispositif donc on applique les conditions de Dirichlet, selon la variation du champ qui est tangentielle au plan

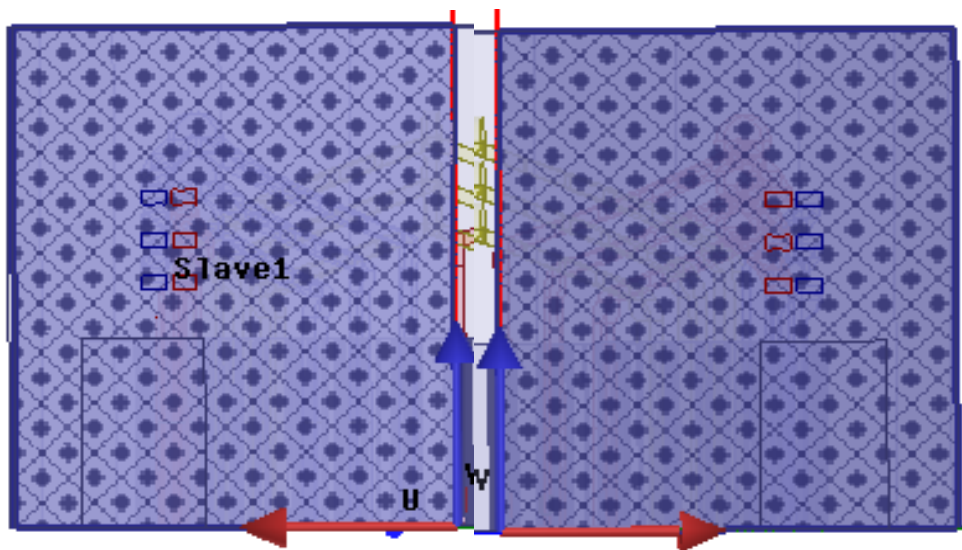


Figure A.12 : application des conditions aux limites

➤ **Excitation des bobines :**

Premièrement, crée des sections pour chaque bobine (sheets) ou on peut visualiser le sens de courant, après crée des coil terminal enfin Winding, suivant ces tapes.

Sélectionner la bobine → bouton droit → Edit → section → surface

Sélectionner sheets → Assing Excitation → coil terminal

Affecter coil terminal dans des Add to winding

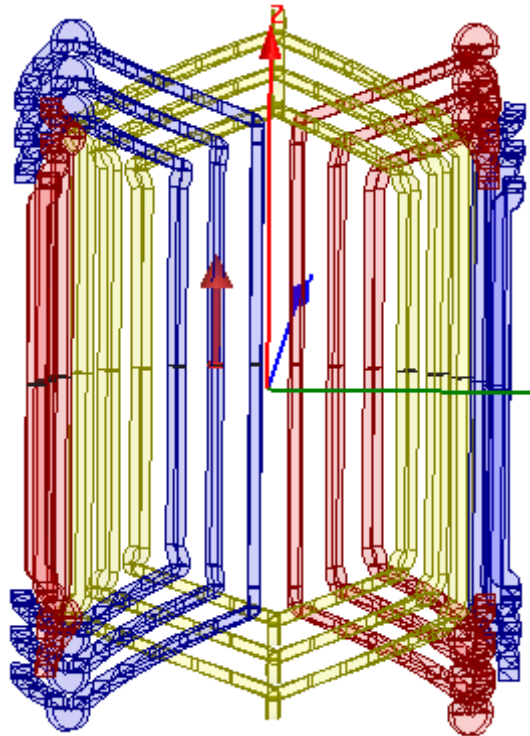


Figure A.13: sens de courant

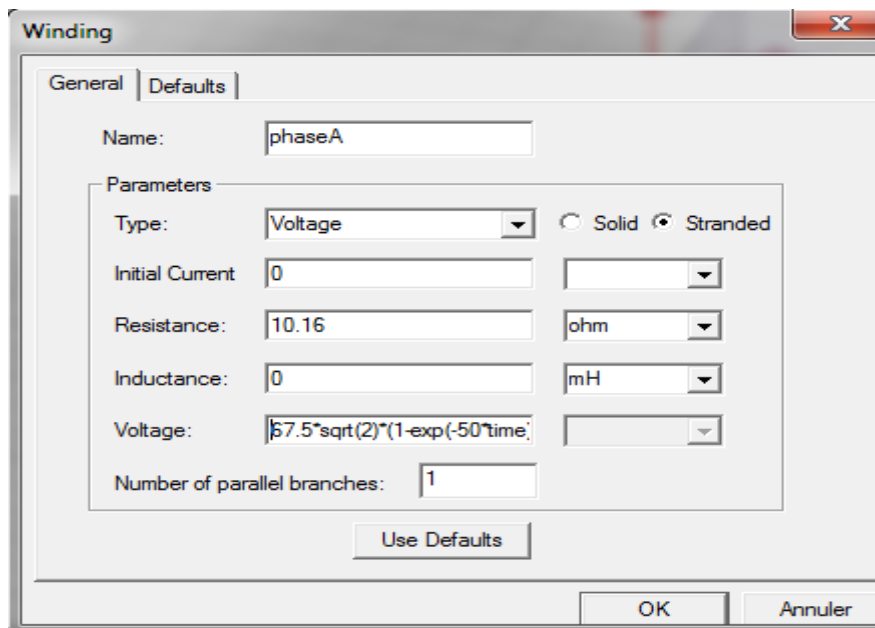

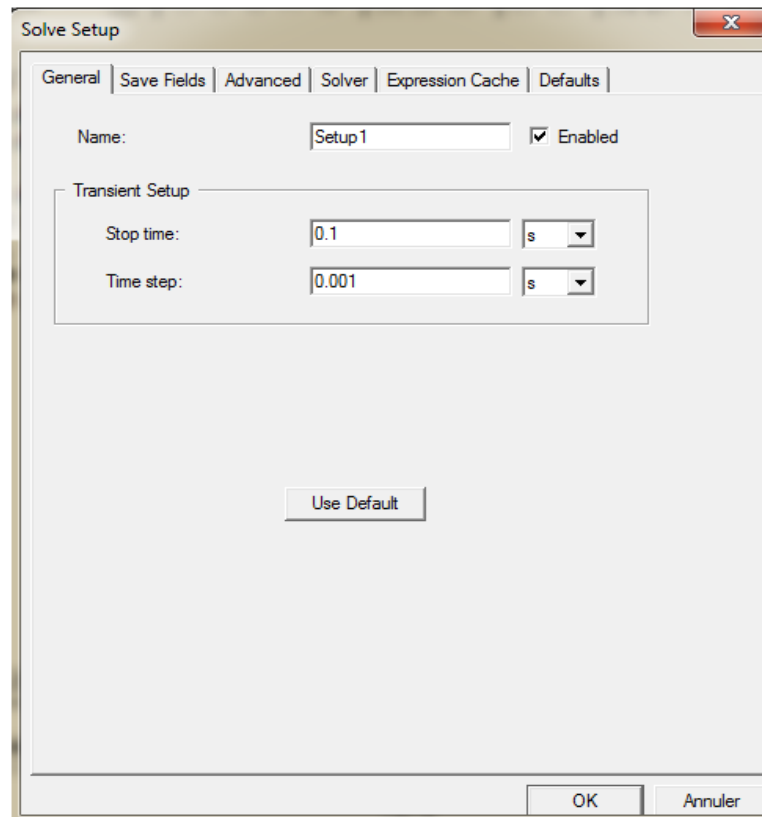


Figure A.14: excitation d'une seule bobine


➤ **Affichage de maillage**

Sélectionner l'objet → Assign mesh operation

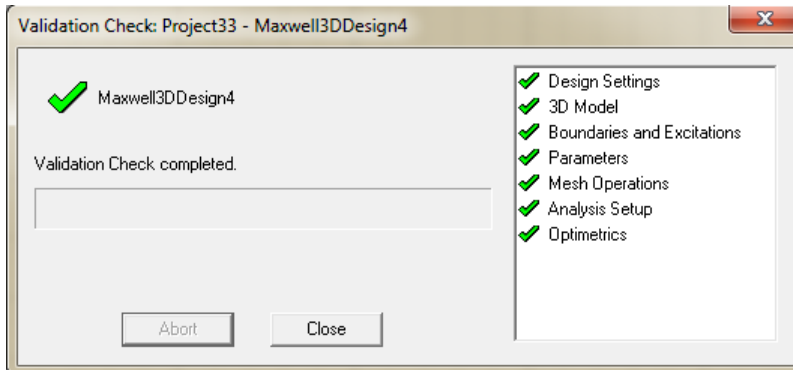
➤ Choisir un temps de simulation : on clique sur cette icône  (solution setup)



➤ Validé et lancer l'analyse

Après quand termine les étapes avant on valide le système avec l'icône suivant : 

Une fenêtre affiche pour détecte les problèmes s'il existe

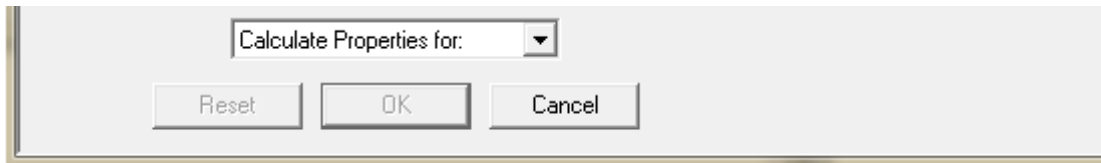


Puis en lance l'analyse à partir de l'icône suivante :



➤ **Résultats** : pour avoir les résultats on clique sur result → creat Quik report

Dans notre étude on a intéressé aux pertes fers, donc quand on a affecté le matériau (figure A.8) nous avons introduit les pertes comme suit :



Dans cette colonne on choisie core loss at one frequency (pertes por une sseule frequence), on aura cettefenêtre.

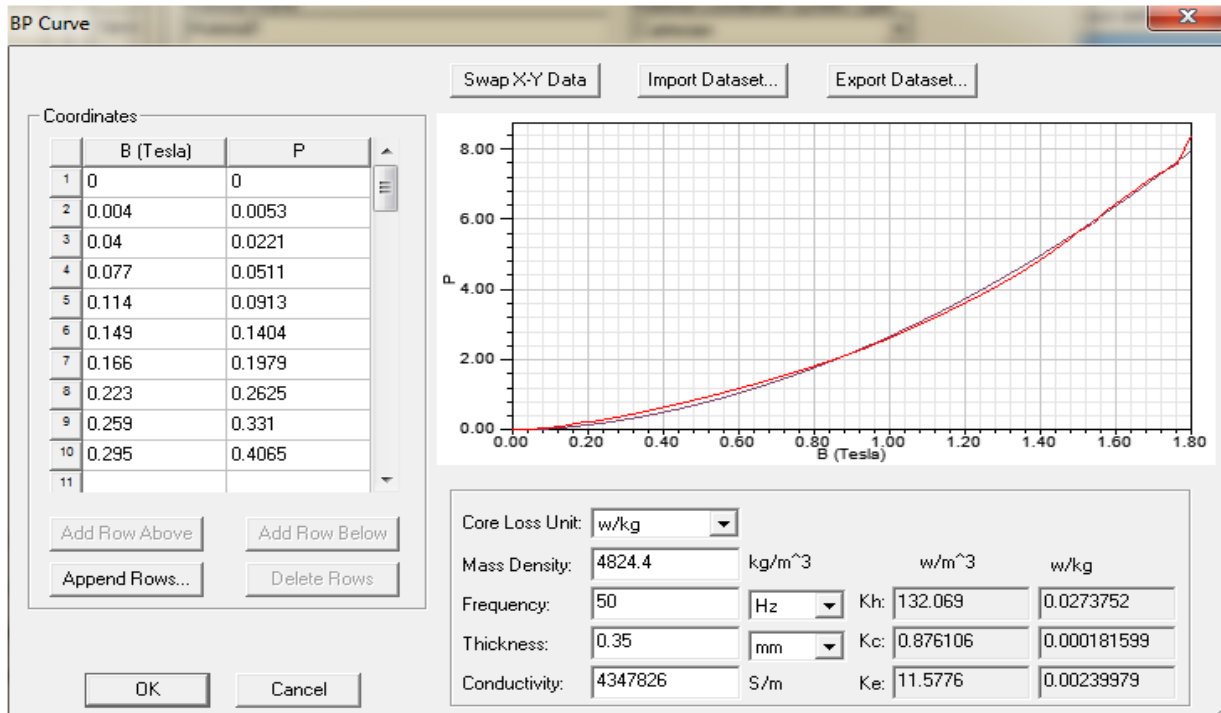


Figure A.15 : Affectation des valeurs P(B) à partir de la figure A.9

Les paramètres injectent pour la courbe P(B)

Masse volumique : 4824.4 Kg/m³

Fréquence :50 Hz

Epaisseur : 0.35 mm

Conductivité : 4347826 S/m

Après la validation de ces paramètres, on trouve les constantes suivantes :

Coefficient de courant de Foucault des pertes fers $K_c = 0.0001$ W/Kg

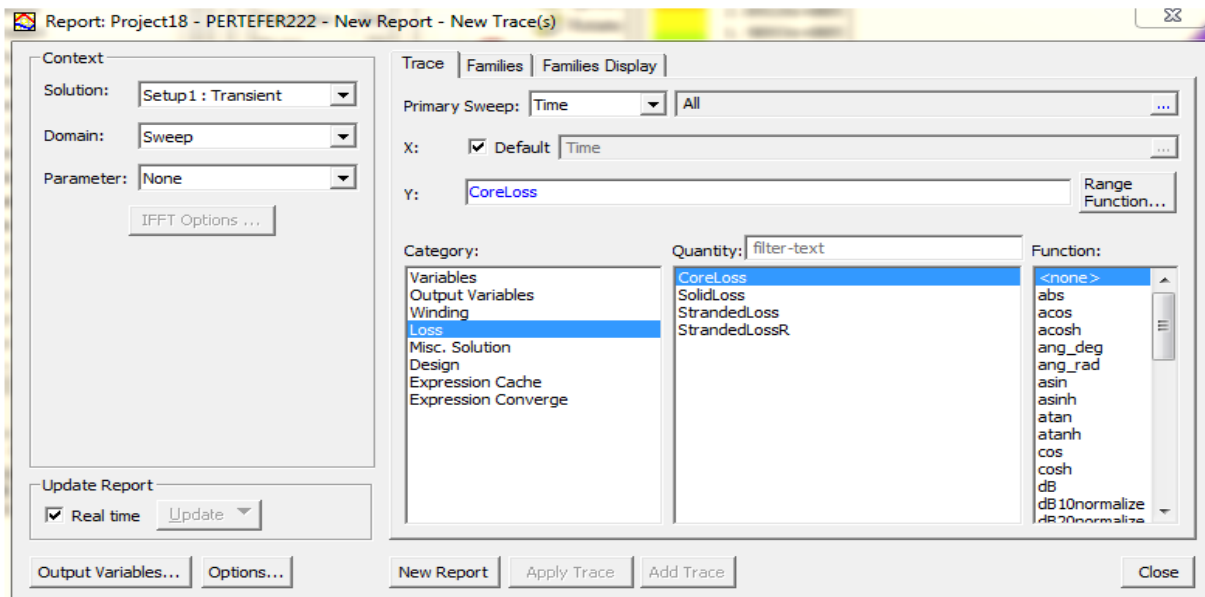
Coefficient d'hystérésis des pertes fers $K_h = 0.03$ W/Kg

Coefficient excess $K_e = 0.002$ W/Kg

➤ **Visualisation des pertes fers**

Pour visualisé les pertes fers on clique sur :

Maxwell 3D → Results → create transient report → rectangular plot



➤ **Visualisation et valeur de l'induction et champ magnétique**

On clique sur le dispositif stator → Maxwell 3D → Fields → Fields → B → mag_B

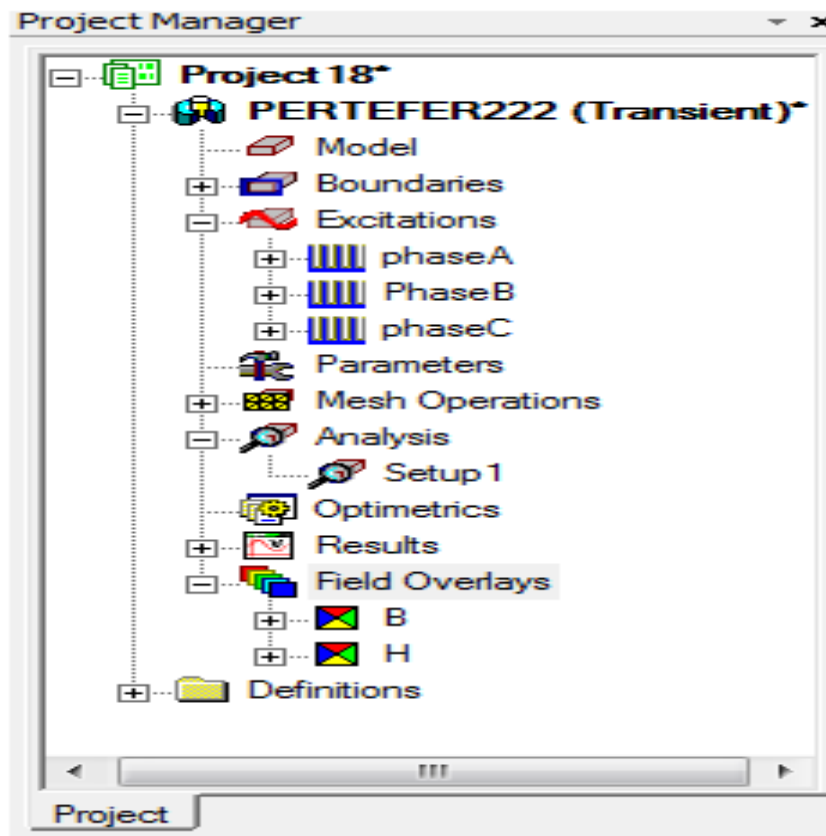
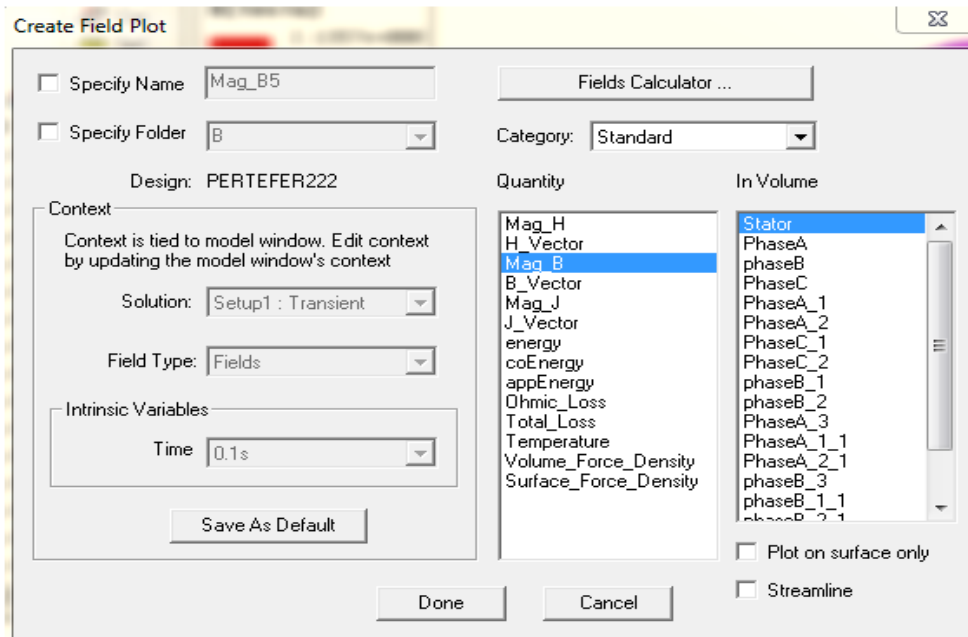


Figure A.16 : les fonctions appliquées pour le dispositif

Paramètres du moteur

Enroulement :	concentrique
Avec un pas= 9 encoche	pas : 1-11, 2-9, 3-7
Nombre d'encoche statorique	$Z_1 = 36$
Fréquence	$f = 50[\text{Hz}]$
Pair de pole	$p = 2$
Diamètre intérieur	$D_{int} = 113.75 [\text{mm}]$
Diamètre extérieur	$D_{ext} = 169.45 [\text{mm}]$
Longueur de la culasse	$L_{cul} = 90.4 [\text{mm}]$
Une couche	
Nombre de branche parallèle	$a_1 = 1$
Nombre de conducteur par encoche	$N_c = 64$
Nombre de bobine en série par phase	$N_{b/ph} = 2$
Nombre de bobine totales	$N_{BT} = 6$
Nombre de spires par phase	$N_{s/ph} = 384$
Nombre de section totale $N_{st} = 1152$	

Type d'encoche

Il existe plusieurs types d'encoches, dans notre cas on a étudié l'encoche suivante :

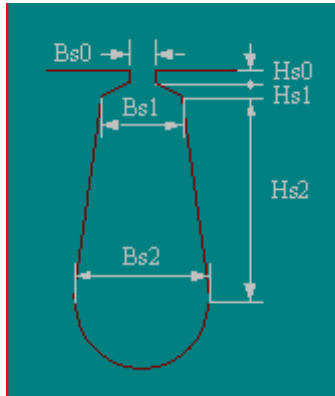


Figure B.1 : type d'encoche étudié

Les valeurs de ces paramètres sont :

$$B_{s0} = 2.8 \text{ [mm]}$$

$$B_{s1} = 4 \text{ [mm]}$$

$$B_{s2} = 6.16 \text{ [mm]}$$

$$H_{s0} = 1 \text{ [mm]}$$

$$H_{s1} = 0$$

$$H_{s2} = 11.435 \text{ [mm]}$$

$$R_s = 3.08 \text{ [mm]}$$